



**Ricardo Jorge Pereira
Vieira**

**Estudo dos limites na capacidade de transmissão
em SCFO**



**Ricardo Jorge Pereira
Vieira**

**Estudo dos limites na capacidade de transmissão
em SCFO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau do Mestrado Integrado em Engenharia de Electrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Dr. Mário Lima, Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e do Doutor Rogério Nogueira, Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações

o júri

Presidente

Prof. Dr. António Luís Jesus Teixeira
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Vogais

Prof. Dr. Henrique Manuel de Castro Faria Salgado
Professor Associado do Departamento de Electrotécnica e de Computadores
da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Prof. Dr. Mário José Neves de Lima
Professor Auxiliar do Departamento de Electrónica, Telecomunicações e
Informática da Universidade de Aveiro

Doutor Rogério Nunes Nogueira
Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações

agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Doutor Mário Lima pela infalível disponibilidade, apoio, compreensão e orientação, bem como ao Doutor Rogério Nogueira pela orientação e pela disponibilidade, que demonstraram ao longo de todo este longo percurso.

Agradeço ainda aos meus amigos, em especial ao Miguel Caldeira e Pedro Domingues pelas longas horas de companheirismo partilhadas nesta odisséia. Deixo uma palavra muito especial de apreço ao Tiago Borges pela amizade e ajuda nas horas mais apertadas.

Aos meus amigos António Carapelho e Artur Sarabando também agradeço pelas horas das nossas pausas.

Finalmente gostaria de agradecer aos meus pais. Pela paciência, apoio, muita compreensão. Mais do que mereço. No final, devo-lhes tudo. Muito obrigado.

palavras-chave

comunicações ópticas, eficiência espectral, formatos de modulação.

resumo

A constante necessidade de aumentar a capacidade de transmissão de dados nos sistemas ópticos impõe uma incessante procura do melhor desempenho, eficiência e qualidade possíveis, de modo a tirar o melhor proveito das potencialidades das fibras ópticas.

Neste contexto, torna-se importante conhecer e comparar os principais formatos de modulação existentes, de modo a que, para uma dada situação de transmissão prática, com um determinado ritmo de transmissão e distância associada, seja possível fazer a melhor escolha do formato de acordo com as necessidades. Este é o principal objectivo deste trabalho.

Os formatos estudados nesta dissertação são o Non Return to Zero (NRZ), Return to Zero (RZ), Duobinário (DB), Vestigial Side Band (VSB), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) bem como o Quadrature Amplitude Modulation com 4 e 6 bits codificados por símbolo (16-QAM e 64-QAM respectivamente) e ritmos de transmissão de 2.5, 10, 20 e 40 Gbps, observando-se as distâncias máximas para cada caso. De modo a fazer o estudo comparativo entre estes formatos foram realizadas uma série de simulações, através do VPISystemsTM, sob as mesmas condições de frequência de funcionamento (nomeadamente o parâmetro da dispersão e PMD das fibras, extinction ratio dos moduladores Mach-Zehnder e potência óptica de saída dos lasers usados) de modo a caracterizar espectralmente os formatos e análise da penalidade de potência. Tendo como base os resultados obtidos destas simulações, foi possível concluir que a ocupância espectral apresentada por cada formato é um bom indicador do seu desempenho e que para ritmos de transmissão superiores a 10Gbps a diferença de resultados entre os formatos de modulação em intensidade e os demais tornam-se muito significativas. Destes últimos formatos destacam-se os formatos de modulação em amplitude e fase (16-QAM e 64-QAM) pelo seu desempenho superior face aos restantes. Destes, o 64-QAM apresenta os melhores resultados sugerindo que um maior número de bits codificados por símbolo poderá permitir melhores resultados. Isto é apoiado pelo facto de um maior número de bits codificados por símbolo se traduzir numa eficiência espectral superior.

Tendo em conta os resultados em WDM, as conclusões são idênticas. Aqui, verificou-se uma diferença significativa de desempenho entre os formatos de intensidade e os formatos em fase ou amplitude e fase. Estes últimos, demonstraram permitir um espaçamento entre canais muito mais reduzindo quando comparado com os formatos de intensidade (aproximadamente 10 GHz face aos 35 GHz dos formatos em intensidade).

No entanto, dever-se-á ter sempre em consideração a potência óptica exigida pelo formato, que tende a aumentar significativamente com a complexidade do formato. Logo, terá sempre de ser encontrado o melhor compromisso entre desempenho e potência exigida para cada situação.

keywords

optical communications, spectral efficiency, modulation formats.

abstract

The constant need for increased data transmission capacity in optic systems imposes an unending search for the best performance, efficiency and quality possible in order to take full advantage of the fiber optics' potentialities. Keeping this in mind, it is important to know and compare the existing main modulation formats so that, in any given situation, the most informed decision can be made regarding one's needs. This is this paper's objective. The studied modulation formats are Non Return to Zero (NRZ), Return to Zero (RZ), Duobinary (DB), Vestigial Side Band (VSB), Quadrature Phase Shift Keying (QPSK), Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) as well as Quadrature Amplitude Modulation with 4 and 6 coded bits per symbol (16-QAM and 64-QAM respectively) and bit rates of 2.5, 10, 20 and 40Gbps observing the maximum distances achieved for each case. In order to undertake a comparative study between these modulation formats, a series of simulations were made, using VPISystemsTM, under similar circumstances characterizing the optical spectrum and power penalty of each modulation format (namely the fiber's dispersion parameter and PMD, Mach-Zehnder modulators' extinction ratio and the lasers' optical output power). Basing on the simulation's results, it was possible to conclude that the optical spectrum's width is an important indicator of a modulation format's performance and that for bit rates superior to 10Gbps, the difference in results between intensity modulation formats and all the others studied formats becomes meaningful. Considering these last formats, the ones showing the best results are the amplitude and phase modulation formats (16-QAM and 64-QAM). From these two it is the 64-QAM which shows the best performance suggesting that an increased number of encoded bits per symbol could lead to better results. This is supported by the fact that a superior number of encoded bits per symbol translates into a superior spectral efficiency. Considering the obtained results for WDM, the conclusions are identical. Here the performance gap between the intensity and phase or amplitude and phase formats is clear. These last formats allow for significantly inferior channel spacing when compared to the intensity modulation formats (approximately 10 GHz compared to 35 GHz from the intensity formats). However, one should keep in mind that the required optical power (even for a back-to-back situation) tends to increase with the complexity of the modulation format in cause. Therefore, the best compromise between required performance and required optical power should be found for each particular situation.

Glossário de acrónimos

ASE	Amplified Spontaneous Emission	Emissão Espontânea Amplificada
BER	Bit Error Rate	Taxa de erros por bit
CD	Chromatic Dispersion	Dispersão cromática
CW	Continuous Wave	Emissão contínua
DFB	Distributed Feedback	Realimentação distribuída
DGD	Differential Group Delay	Atraso de grupo diferencial
DI	Delay interferometer	
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying	Modulação diferencial de fase em quadratura
DSB	Dual Side Band	Banda lateral dupla
DSF	Dispersion Shifted Fiber	Fibra de dispersão deslocada
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Multiplexagem densa no comprimento de onda
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier	Amplificadores a fibra dopada com Erbó
FWM	Four Wave Mixing	Mistura de quarto ondas
GVD	Group Velocity Dispersion	Variação da velocidade de grupo
IES ou ISI	Inter Symbol Interference	Interferência entre símbolos
MZM	Mach-Zehnder Modulator	Modulador Mach-Zehnder
NRZ	Non Return to Zero	Não retorno a zero
OOK	On/Off Keying	Modulação “ <i>On/Off</i> ”
PIN	Positive-Intrinsic-Negative	Positivo-Intrínseco-Negativo (fotodíodo)
PMD	Polarization Mode Dispersion	Dispersão por modos de polarização
PON	Passive Optical Network	Rede óptica passiva

PRBS	Pseudo Random Bit Sequence	Sequência binária pseudo-aleatória
PSK	Phase Shift Keying	Modulação em fase
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	Modulação em quadratura e amplitude
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	Modulação em quadratura de fase
RZ	Return to Zero	Retorno a zero
ROP	Received Optical Power	Potência óptica recebida
SBS	Stimulated Brillouin Scattering	Espalhamento estimulado de Brillouin
SCFO		Sistemas de Comunicação em Fibras Ópticas
SER	Symbol Error Rate	Taxa de erros por símbolo
SPM	Self-Phase Modulation	Automodulação de fase
SRS	Stimulated Raman Scattering	Espalhamento estimulado de Raman
SSB	Single Side Band	Banda lateral única
SSMF	Standard Single Mode Fiber	Fibra monomodo padrão
UDWDM	Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing	Multiplexagem ultra densa no comprimento de onda
VSF	Vestigial Side Band	Banda lateral vestigial
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexagem no comprimento de onda
XPM	Cross-Phase modulation	Modulação cruzada de fase

Lista de símbolos

λ	Comprimento de onda
$\Delta\lambda$	Espectro de comprimentos de onda
ω	Frequência angular
$\Delta\omega$	Espectro de frequências angulares
β_2	Dispersão da velocidade de grupo
β_3	Variação da GVD com a frequência angular
D	Parâmetro da Dispersão
D_m	Dispersão material
D_p	Dispersão de perfil
D_w	Dispersão do guia
v_g	Velocidade de grupo
α	Constante de atenuação
n_1	Índice de refração do núcleo
n_2	Índice de refração da bainha
\bar{n}_g	Índice de grupo

Conteúdo

Glossário de acrónimos.....	II
Lista de símbolos	IV
Lista de figuras.....	VI
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1 – Contexto histórico	1
1.2 – Estado da arte	7
1.3– Motivação.....	8
1.4 – Estrutura e objectivos.....	12
1.5 – Contribuições	13
Capítulo 2 – Sistemas ópticos: Principais factores lineares limitadores da transmissão	14
2.1 – Atenuação.....	14
2.2 – Dispersão.....	16
2.3 – Dispersão dos modos de polarização - PMD (Polarization-Mode Dispersion)	19
2.4 – Efeitos Não-Lineares.....	20
Capítulo 3 – Modulação.....	22
Capítulo 3.1 – Formatos de modulação	22
3.1.1 – Formatos de modulação em intensidade	23
3.1.2 – Formatos de modulação em fase	29
3.1.3 – Formatos de modulação em amplitude e fase	32
3.2 – Emissão e recepção	33
Capítulo 4 – Apresentação de resultados	39
4.1 – Caracterização Espectral	42
4.2 – Penalidade de potência.....	45
4.3 – WDM	51
Capítulo 5 – Considerações finais.....	57
5.1 – Conclusões	57
5.2 – Sugestões.....	60
Referências.....	61

Lista de figuras

Figura 1.1. 1 - Evolução da capacidade dos sistemas de comunicação, BL, desde 1850. O surgimento de novas tecnologias é marcado com círculos cheios.	2
Figura 1.1. 2 - Geometria típica de uma fibra óptica. O raio da fibra a é da ordem de 3 mm. n_2 e n_1 são os índices de refração da bainha e do núcleo da fibra respectivamente.....	3
Figura 1.1. 3 - Diagrama esquemático de um Amplificador a Fibra Dopada com Érbio (EDFA)	5
Figura 1.1. 4 - Gerações de sistemas de comunicação óptica. Mostram-se as distâncias e taxas típicas em cada uma delas como também os factores limitadores na propagação em cada caso.	6
Figura 1.3. 1 - Taxa de transmissão versus distância sem regeneração [23]	9
Figura 1.3. 2- Capacidade instalada em 2005 das rotas de internet conectadas aos Estados Unidos. [24]	10
Figura 1.3. 3- Atenuação versus comprimento de onda (λ) de uma fibra óptica padrão e as bandas padronizadas (O, E, S, C, L e U/XL). [24]	11
Figura 2.1. 1 - Atenuação de uma fibra óptica monomodo padrão em função do comprimento de onda (λ), e a indicação das super-bandas A e B. [24]	15
Figura 2.2. 1 - A velocidade da propagação para os diversos componentes espectrais do sinal transmitido é diferente devido à dispersão cromática resultando num sinal “alargado” temporalmente e com menor amplitude no receptor.....	16
Figura 2.2. 2 - Dispersão cromática (CD) de uma fibra monomodo padrão SSMF (Standard Single-Mode Fiber) indicada pela curva D, onde $D=D_m + D_w$; D_m = Dispersão do material; D_w = Dispersão do guia de onda. [28]	17
Figura 2.3. 1 - Exemplo de DGD (Differential Group Delay), a propagação em cada eixo ocorre em velocidades distintas resultando num atraso entre os sinais em propagados em cada eixo. [26]	20
Figura 3.1. 1 - Evolução e origem dos principais formatos de modulação. [23]	23
Figura 3.1.1. 1 - Sinal com modulação NRZ	24
Figura 3.1.1. 2 - Sinal com modulação RZ	25

Figura 3.1.1. 3 – Geração do sinal DB, (a) filtro digital para o sinal eléctrico DB, (b) dual-derive MZM, (c) Polarização do MZM e condições para o sinal DB óptico. [33]	27
Figura 3.1.1. 4 - Detalhes do filtro óptico VSB.	28
Figura 3.1.1. 5 - Propriedades espectrais da modulação VSB comparado com as de um DSB.	29
Figura 3.1.2. 1 - Sinal com modulação PSK	30
Figura 3.1.2. 2 – Transmissor DQPSK	31
Figura 3.1.2. 3 - Receptor balanceado	31
Figura 3.1.2. 4 - Sinal com modulação QPSK/DQPSK	31
Figura 3.1.3. 1- Esquema das constelações do 16-QAM e 64-QAM.	32
Figura 3.2. 1 - Esquema do emissor NRZ	33
Figura 3.2. 2 - Esquema do emissor RZ	34
Figura 3.2. 3 - Esquema do emissor Duobinário	34
Figura 3.2. 4 - Esquema do emissor VSB	35
Figura 3.2. 5 - Características do filtro óptico VSB	36
Figura 3.2. 6 - Estrutura do receptor de detecção directa	36
Figura 3.2. 7 - Esquema genérico do emissor para o QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM	37
Figura 3.2. 8 - Esquema genérico para o receptor do QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM	38
Figura 4. 1 - Quadro dos parâmetros para uma fibra óptica genérica usada nas simulações	40
Figura 4. 2 - Esquema de simulação do VPISystems TM para o formato de modulação NRZ-OOK.	40
Figura 4. 3 - BER vs. ROP para vários valores de dispersão acumulada para o formato NRZ-OOK a 10Gbps	41
Figura 4.1. 1 - Espectros ópticos e respectivos diagramas de olho ou constelações dos formatos (a)NRZ-OOK (b)RZ-OOK (c)Duobinário (d)NRZ-VSB (e)QPSK (f)DQPSK (g)16-QAM (h)64-QAM	44
Figura 4.2. 1 - Penalidade de potência vs. distância de fibra para os formatos (a)NRZ-OOK (b)RZ-OOK (c)Duobinário (d)NRZ-VSB (e)QPSK (f)DQPSK (g)16-QAM (h)64-QAM	46
Figura 4.2. 2 - Penalidade de potência vs comprimento da fibra	49
Figura 4.3. 1 - Resposta do filtro usado para a demultiplexagem WDM	53

Figura 4.3. 3- Esquema de simulação do VPISystems TM para o formato de modulação NRZ-OOK em WDM.....	53
Figura 4.3. 4- Espectros ópticos à saída do transmissor para o formato NRZ-OOK para diferentes valores de espaçamento entre canais (a) 10GHz (b) 50GHz	54
Figura 4.3. 5 - Penalidade de potência vs espaçamento entre canais para os formatos NRZ, RZ, Duobinário e VSB.....	54
Figura 4.3. 6 - Penalidade de potência vs espaçamento entre canais para os formatos QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM	55

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Contexto histórico

No sentido amplo do termo, as comunicações ópticas datam da antiguidade já que o uso de luz para propósitos de comunicação foi usado por muitas civilizações através do fogo e fumo.

A mesma ideia foi usada até fins do século XVIII através de lâmpadas de sinalização, bandeiras e outros dispositivos. A ideia foi posteriormente estendida, seguindo uma sugestão de Claude Chappe em 1792, à transmissão de mensagens sobre longas distâncias (~ 100 km) por meio do uso de “estações repetidoras”. No entanto, a luz era usada apenas para que os sinais codificados fossem visíveis e interceptados por estas “estações repetidoras”.

Estes sistemas de comunicação eram claramente arcaicos mas com o advento da telegrafia em 1830, o uso de luz pela electricidade, deu início à era das comunicações eléctricas dando origem ao código mais conhecido em todo o mundo, o código Morse [1]. O primeiro cabo transatlântico foi instalado em 1858 (funcionando por apenas por 26 dias) sendo em 1861 instalado um outro cabo desta vez com sucesso.

A invenção do telefone no ano 1876 trouxe uma grande mudança no sentido de transmitir sinais eléctricos analógicos. As técnicas de comunicação eléctricas analógicas iriam dominar os sistemas de comunicação por mais um século.

O desenvolvimento de redes telefónicas no século XX conduziu a grandes avanços no desenho de sistemas de comunicação eléctrica. O uso de cabos coaxiais (ao invés dos pares trançados tradicionais) aumentou a capacidade dos sistemas consideravelmente. O primeiro sistema que usou cabos coaxiais entrou em funcionamento em 1940 com capacidade de transmissão de 300 canais de voz ou um único canal de televisão.

A largura de banda destes sistemas era muito limitada, principalmente pelas perdas dos cabos, as quais crescem muito para frequências acima dos 10 MHz. Esta limitação conduziu ao desenvolvimento de sistemas de comunicação de microondas nos quais uma portadora electromagnética de 1 ~ 10 GHz é usada para transmitir a informação, usando técnicas adequadas de modulação. O primeiro sistema de comunicação de microondas a 4 GHz começou a operar em 1948. Desde então, os sistemas eléctricos e de microondas têm

evoluído consideravelmente e são agora capazes de operar a taxas de transmissão na ordem dos 100 Mbps. O mais avançado sistema coaxial foi posto em serviço em 1975 e opera a uma taxa de 274 Mbps.

A capacidade de um sistema de comunicação é frequentemente medida através do produto BL, onde B é a taxa de transmissão e L é a distância entre estações repetidoras. A fig. 1.1.1 mostra como o produto BL tem aumentado ao longo dos anos. Sistemas de comunicação (com BL ~ 100 Mbps – km) estavam disponíveis em 1970.

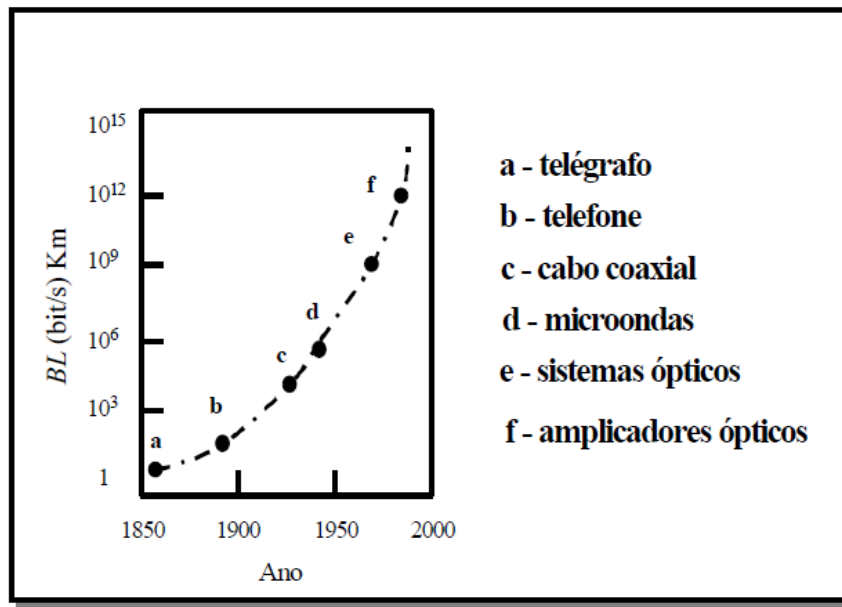


Figura 1.1. 1- Evolução da capacidade dos sistemas de comunicação, BL, desde 1850. O surgimento de novas tecnologias é marcado com círculos cheios.

Na segunda metade do século XX foi percebido que um aumento de várias ordens de grandeza na capacidade dos sistemas de comunicação poderia ser atingido se, como portadoras, fossem usadas ondas ópticas. No entanto, em 1950 não existiam fontes de luz adequadas, nem um meio suficientemente transparente para a transmissão da luz. A invenção e demonstração do laser em 1960 abriram novas perspectivas de aplicações da luz laser para comunicações ópticas. Em 1966 foi sugerido o uso de fibras ópticas para confinar a luz, da mesma forma que os electrões são guiados em cabos de cobre [2-3]. Na fig. 1.1.2 mostra-se a geometria típica de uma fibra óptica.

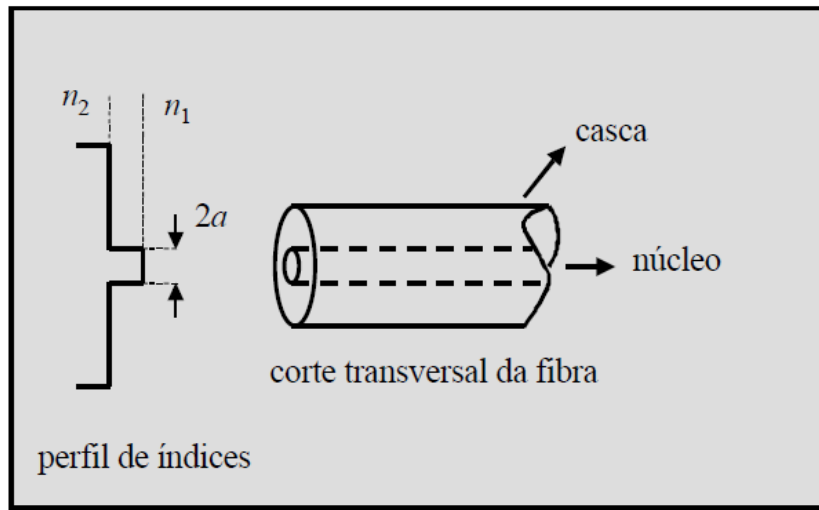


Figura 1.1. 2 - Geometria típica de uma fibra óptica. O raio da fibra a é da ordem de 3 mm. n_2 e n_1 são os índices de refração da bainha e do núcleo da fibra respectivamente

As perdas das fibras ópticas disponíveis em 1960 eram demasiado elevadas (~ 1000 dB/km) para serem utilizadas em comunicações. Dois grandes avanços foram conseguidos na década de 1970 quando as perdas foram reduzidas a ~ 20 dB / km na região de comprimentos de onda em torno de $0.8\mu\text{m}$ e díodos laser de GaAs, que operam continuamente nessa região à temperatura ambiente foram demonstrados [4]. A disponibilidade simultânea de fontes ópticas compactas e de fibras ópticas de baixa perda conduziram a um grande esforço mundial no desenvolvimento de sistemas de comunicação óptica.

A primeira geração de sistemas ópticos a operar na região de $0.8\mu\text{m}$ começou a ser instalada em 1978 (a região de $0.8\mu\text{m}$ é conhecida como a primeira janela das comunicações ópticas) [5]. Estes sistemas operavam em taxas de 50 Mbps a 100 Mbps com um espaçamento entre estações repetidoras de ~ 10 km.

Durante os anos 70 verificou-se que o espaçamento entre estações repetidoras poderia ser aumentado operando o sistema na região de $1.3\mu\text{m}$, onde a perda das fibras é menor que 1 dB/km e a fibra apresenta o mínimo de dispersão (o fenómeno da dispersão vem da dependência do índice de refração da fibra com a frequência e conduz ao alargamento temporal dos impulsos ao longo da propagação). As fibras que apresentam o mínimo da dispersão em $1.3\mu\text{m}$ são chamadas de fibras convencionais ou fibras padrão.

Um grande esforço mundial foi dedicado ao desenvolvimento de lasers e detectores neste comprimento de onda (InGaAsP) que culminou com a demonstração destes lasers em 1977

[6]. Esta nova geração de sistemas de comunicação óptica esteve pronta no começo dos anos 80 e permitia espaçamentos entre repetidoras da ordem de 20 km. A taxa estava por baixo dos 100 Mbps devido principalmente a dispersão modal das fibras multimodo que eram empregadas (hoje em dia, os sistemas de comunicação óptica usam quase exclusivamente fibras monomodo. Por este motivo, nesta tese não serão abordados os problemas da dispersão intermodal).

As fibras multimodo são utilizadas apenas para aplicações onde a taxa de transmissão é baixa e as distâncias curtas (~ 1 km). As redes locais de computadores são um exemplo destas aplicações. Esta última limitação foi superada pelo uso de fibras monomodo. Uma experiência no ano 1981 mostrou taxas de 2 Gbps em 44km neste tipo de fibra [7].

Em 1987 estavam prontos sistemas comerciais operando na região de $1.3\mu\text{m}$ de segunda geração com taxas de 1.7Gb/s e espaçamento entre repetidoras de ~ 50 km. A distância entre repetidoras nestes sistemas está limitada pela atenuação da fibra, da ordem de 0.5 dB/km. Porém, a perda da fibra na região de $1.5\mu\text{m}$ é de ~ 0.2 dB/km.

A introdução de sistemas a operar nos $1.5\mu\text{m}$ (a chamada terceira janela das comunicações ópticas) foi demorada pela grande dispersão que as fibras apresentam nesta região. Lasers convencionais de InGaAsP não podem ser utilizados por terem um espectro muito largo o que produz um grande alargamento dos impulsos devido à dispersão. Este problema pode ser resolvido de duas formas. Utilizando fibras que tenham o mínimo da dispersão na região de $1.5\mu\text{m}$ (fibra de dispersão deslocada ou Dispersion Shifted Fiber, DSF) ou usando lasers com espectros muito finos. Ambas alternativas foram desenvolvidas nos anos 80.

A terceira geração de sistemas de comunicação óptica operando a 2.4Gbps estava disponível em 1990. Nestes sistemas, o melhor desempenho é obtido mediante o uso de fibras DSF e de lasers de um só modo longitudinal (lasers DFB, Distributed Feedback).

No início da década de 90 o surgimento a nível comercial dos Amplificadores a Fibra Dopada com Érbio (EDFAs) [8], os quais permitem amplificar os sinais ópticos (sem qualquer conversão do sinal óptico para sinal eléctrico), revolucionou o campo das comunicações ópticas. Em 1992 já eram usados na indústria de televisão por cabo para distribuição de vídeo.

Na fig. 1.1.3 mostra-se esquematicamente um EDFA. Na configuração mais básica ele consiste de um acoplador WDM (chamado de Wavelength Division Multiplexer) que

combina o sinal transmitido ($1.5\mu\text{m}$) junto com um feixe de bombeamento (0.98 ou $1.48\mu\text{m}$) através da fibra dopada com érbio. Este bombeamento excita os iões de Er^{3+} os quais cedem sua energia ao sinal, amplificando-o.

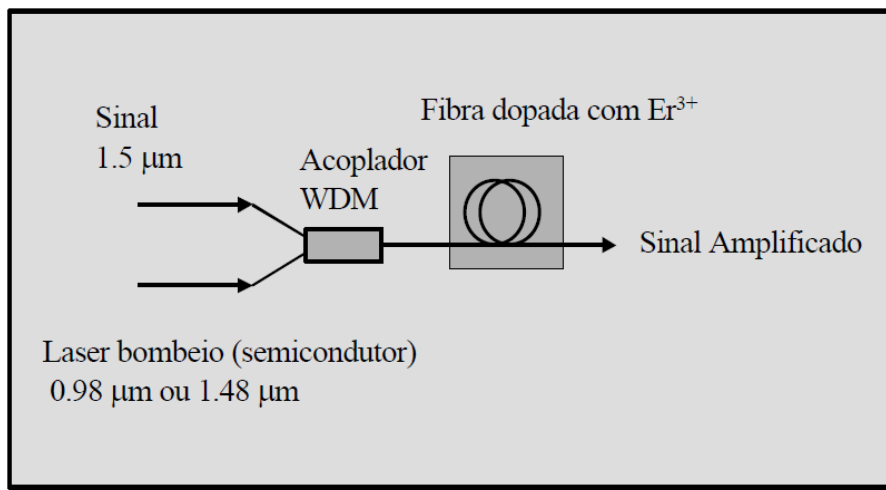


Figura 1.1. 3 - Diagrama esquemático de um Amplificador a Fibra Dopada com Érbio (EDFA)

Os sistemas que utilizam estes amplificadores são conhecidos como sistemas de quarta geração, embora esta definição não seja uniforme, dado que os sistemas que empregam comunicação óptica coerente (sistemas nos quais a informação é codificada na fase do campo eléctrico) ou os sistemas que empregam solitons são chamados sistemas de quarta ou quinta geração dependendo do autor.

A fig. 1.1.4 esquematiza a evolução dos sistemas ópticos até aos dias de hoje. Os sistemas ópticos que operam na primeira janela em $0.8\mu\text{m}$ tinham limitado o espaçamento entre repetidoras ($L \sim 10\text{ km}$) devido à grande atenuação da fibra e à grande dispersão cromática. A geração seguinte de sistemas ópticos usava a segunda janela em $1.3\mu\text{m}$ ($L \sim 20 - 50\text{ km}$) estando limitados pela atenuação da fibra. A geração de sistemas da terceira janela das comunicações ($1.5\mu\text{m}$) e usando como meio de transmissão fibras de dispersão deslocada permitiu atingir distâncias de transmissão de 250 km sem repetidores.

Observa-se que a motivação por trás das diferentes gerações de sistemas foi a de usar comprimentos de onda para os quais a fibra apresenta coeficientes de atenuação menores. Num sistema de transmissão linear, as limitações à propagação de sinais sem distorção e sua posterior detecção vêm dadas pela atenuação e pela dispersão cromática da fibra. Na primeira janela, as grandes limitações eram a atenuação e a dispersão da fibra.

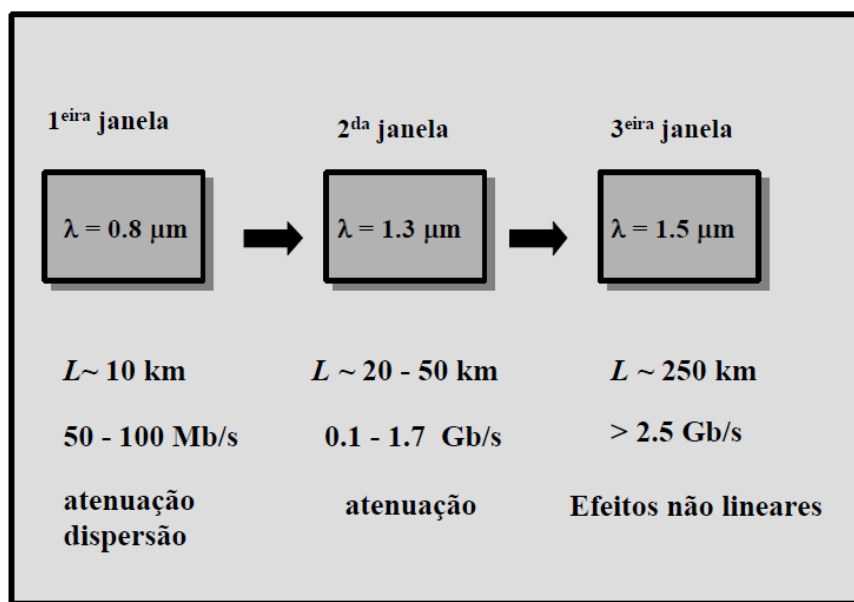


Figura 1.1. 4 - Gerações de sistemas de comunicação óptica. Mostram-se as distâncias e taxas típicas em cada uma delas como também os factores limitadores na propagação em cada caso.

Na segunda janela, a menor atenuação da fibra permitiu aumentar o espaçamento entre estações repetidoras, mas era ainda era o factor limitador. Na terceira janela, a atenuação da fibra é mínima permitindo, em teoria, aumentar ainda mais o espaçamento entre estações repetidoras. Contudo a dispersão não é. Fundamentalmente, a dispersão cromática conduz à Interferência InterSímbolo (ISI), que faz com que cada bit originalmente alocado a um determinado intervalo temporal, fique mais largo e se misture com os bits adjacentes, aumentando deste modo, a probabilidade de erro na detecção. A procura de uma solução ao problema da dispersão motivou o desenvolvimento das fibras de dispersão deslocada, DSFs.

Paralelamente, a potência dos lasers transmissores foi subindo possibilitando, pelo menos desde o ponto de vista da atenuação da fibra, colocar as estações repetidoras ainda mais longe. Este incremento de potência e da distância de propagação fez com que os efeitos não lineares na fibra comesçassem a ser relevantes. Quando estes efeitos deixam de ser desprezáveis, o ponto de operação mais conveniente deixa de ser o mínimo de dispersão da fibra pois à medida que nos aproximamos deste ponto, os efeitos não lineares aumentam. Assim, é desejável operar o sistema num comprimento de onda para o qual a dispersão seja pequena (de modo a não introduzir ISI) mas não nula. Estes factos têm motivado nos

últimos anos o desenvolvimento de novos tipos de fibras com valores específicos de dispersão adequadas para a transmissão de informação em longas distâncias.

1.2 – Estado da arte

Actualmente, devido às altas exigências do domínio da velocidade e quantidade de informação a ser transmitida nos sistemas de comunicações ópticas, a *wavelength division multiplexing* (WDM) representa um dos avanços mais importantes no que a este campo diz respeito.

Após a introdução de EDFAs em sistemas WDM, podem ser acomodados cerca de 40 canais na banda C com 100 GHz (0.8 nm) de espaçamento entre canais. Segundo este conceito, e usando *ultra-dense* WDM (UDWDM), o espaçamento entre canais pode ser reduzido até 12.5 GHz [9-10], onde já foram realizadas transmissões até 2.5 Tbps usando 256 canais a 12.5 Gbps cada ao longo de uma standard *single mode fiber* (SSMF), podendo ainda ser atingidas capacidades de transmissão superiores usando as bandas S e L ou aumentando o ritmo de transmissão de cada canal cuja capacidade de realização a ritmos de transmissão como 40 Gbps já foi demonstrada em diversos trabalhos. [11-17]

Avanços adicionais em redes WDM podem ser alcançados usando formatos de modulação avançados, devido às suas reduzidas larguras espectrais e maior resistência à dispersão cromática (CD) em que se destacam o QPSK e DQPSK bem como o M-QAM [18-20] e, usando ainda a técnica de *Time Division Multiplexing* (TDM), que é a técnica mais usada para multiplexar um grande número de canais de baixo ritmo de transmissão em apenas um canal de alto ritmo de transmissão.

Usando esta técnica em conjunção com a técnica de *polarization dispersion multiplexing* (PDM), a capacidade dos canais WDM pode ser quadruplicada [21] permitindo atingir uma transmissão de 25.6 Tbps ao longo de 240 km de fibra usando 160 canais (160 Gbps em cada canal) com um espaçamento de 50 GHz (nas bandas C+L) usando o RZ-DQPSK a 85.4 Gbps como formato de modulação. Isto resultou numa eficiência espectral de 3.2 b/s/Hz. Valor recorde em sistemas de comunicação ópticos até 2008. [22]

Mais recentemente, reportou-se 320×114 Gbps PDM-RZ-8 *quadrature amplitude modulation* (QAM) em *dense* WDM (DWDM) com um espaçamento entre canais de 25

GHz ao longo de 580 km de ultra-low-loss SMF, resultando numa capacidade de transmissão de 32 Tbps. Valor recorde até 2009.

A *duty cycle division multiplexing* (DCDM) é uma outra nova técnica de modulação que permite múltiplos utilizadores em cada canal WDM. Nesta técnica os sinais multiplexados têm uma *rising edge transition* no início do símbolo multiplexado. Esta é uma propriedade singular permitindo que o ritmo de transmissão agregado seja recuperado no ritmo *símbolo/ baud* que, até à data e pelo conhecimento do autor, nunca foi demonstrada em qualquer outra técnica de multiplexagem.

1.3- Motivação

A massificação da electrónica, informática e sistemas digitais bem como o exponencial crescimento da Internet são responsáveis por uma crescente exigência de capacidade de transmissão nos sistemas de telecomunicações actuais.

A procura de crescentes larguras de banda em diversas aplicações, exige dos sistemas de telecomunicações uma crescente capacidade de resposta, na qual as comunicações em fibra óptica já desempenham um papel importante e, atendendo à evolução das exigências dos consumidores em termos de largura de banda e qualidade de serviço, terá uma relevância fundamental nas comunicações metropolitanas, regionais e transatlânticas.

Para os diversos sistemas de transmissão conhecidos e usados actualmente, tais como par trançado, cabo coaxial, microondas (terrestre e via-satélite), sistemas sem fio (“*wireless*”) (móveis e fixos) e sistemas ópticos (fibras ópticas e de espaço livre) visualizados na figura 1.3.1, os únicos sistemas que conseguirão suportar o crescimento esperado da capacidade de transmissão serão os sistemas ópticos.

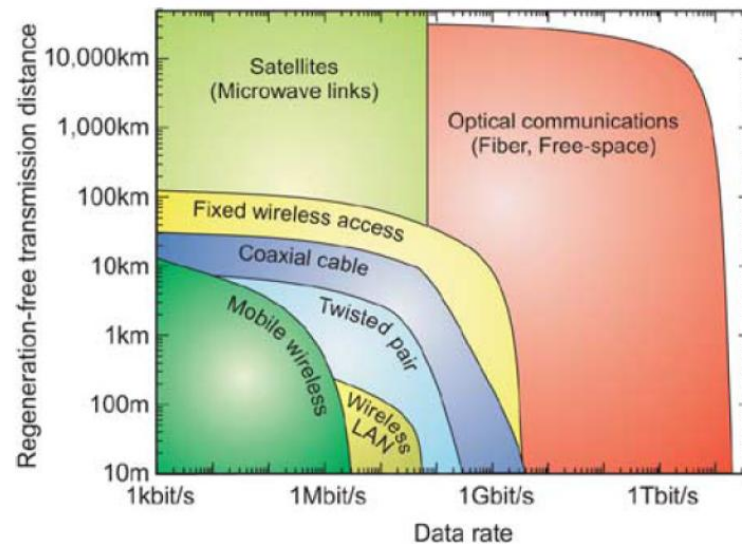


Figura 1.3. 1- Taxa de transmissão versus distância sem regeneração [23]

Na fig.1.3.1 pode-se observar a taxa de transmissão *versus* a distância de transmissão sem regeneração do sinal. A distância de transmissão sem regeneração do sinal é definida como a distância que o sinal pode ser recebido e a informação digital recuperada [23]. Nesta figura é observado que para taxas de transmissão maiores de 10Gbit/s apenas os sistemas ópticos de comunicações suportam tal capacidade. [23-24]

Nos sistemas ópticos actuais as fibras ópticas são os meios de transmissão mais usados para o transporte de informações no mundo, sejam elas, intercontinentais, regionais e até mesmo metropolitanas. Desta forma, verifica-se a importância dos sistemas de fibras ópticas para a transmissão de informação a nível global no presente e no futuro previsível. Novas tecnologias, serviços e arquitecturas de rede como PON (*“Passive Optical Networks”*) irão assegurar crescentes capacidades de transmissão aos consumidores e empresas e, mesmo que a disseminação destas tecnologias se verifique apenas para uma fracção da população, que hoje possui acesso internet, esta já seria responsável por um acréscimo de 2.000 Tbps (*“upload”*) e de 20.000 Tbps (*“download”*) da necessidade de capacidade de transmissão. Tais estimativas, mesmo que conservadoras, são um alerta para o problema latente do congestionamento nas principais rotas locais, regionais e continentais de tráfego de dados.

Para assegurar a capacidade necessária, os fornecedores de telecomunicações podem aumentar as rotas actuais dos sistemas ópticos com novos cabos e fibras ópticas, mas

existem limitações na capacidade mundial de fabrico e instalação destes cabos, para além dos elevados custos destes empreendimentos. [24]

Na figura 1.3.2 pode-se verificar a capacidade instalada de transmissão de internet dos Estados Unidos em 2005. Observa-se que, existindo alternativas para o crescimento da largura de banda sem a construção de novas rotas transatlânticas de fibra óptica, maximizar-se-ia o retorno do investimento já efectuados nos últimos anos.

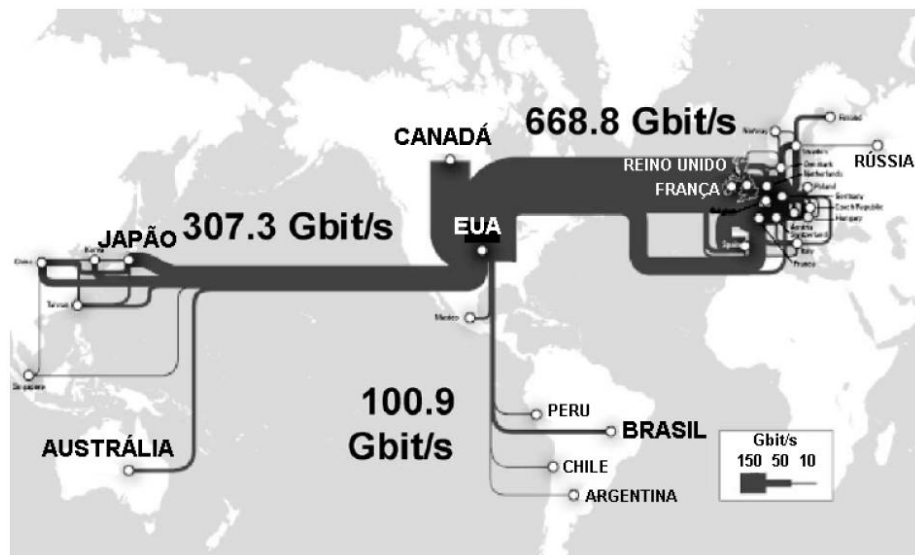


Figura 1.3. 2- Capacidade instalada em 2005 das rotas de internet conectadas aos Estados Unidos. [24]

A capacidade de transmissão de dados das fibras ópticas monomodo actuais é estimada em 125 Tbit/s, a ITU-T (*International Telecommunication Union*) padroniza o uso de apenas 59 Tbps de capacidade (as bandas padronizadas pela ITU-T: O, E, S, C, L e U/XL ocupam apenas os comprimentos de onda (λ) entre os 1260nm e os 1675nm. Verifica-se portanto, a possibilidade do aumento da utilização das fibras ópticas já existentes desde que sejam resolvidos os problemas encontrados a taxas de transmissão mais elevadas e a ocupação dos demais comprimentos de onda disponíveis nas fibras ópticas. [24]

Assim, a escolha do formato de modulação é um dos factores que podem melhorar os sistemas ópticos de alto débito, de modo a assegurar o uso completo das capacidades disponíveis de transmissão das fibras ópticas.

Para este aumento da capacidade de transmissão será necessário, entre outros aspectos, o desenvolvimento de transmissores e receptores que cubram as janelas de 1.0 - 1.7 μm

(figura 1.3.3), integração massiva de amplificadores ópticos “*ultrabroadband*” e desenvolvimento das super-bandas A, B bem como a migração para sistemas coerentes. Neste contexto, o estudo dos formatos de modulação ópticos torna-se um contributo imperativo não apenas para a maximização da eficiência dos sistemas ópticos mas também se constitui como uma alternativa no curto prazo para permitir a construção de sistemas mais flexíveis e futuras expansões de capacidade.

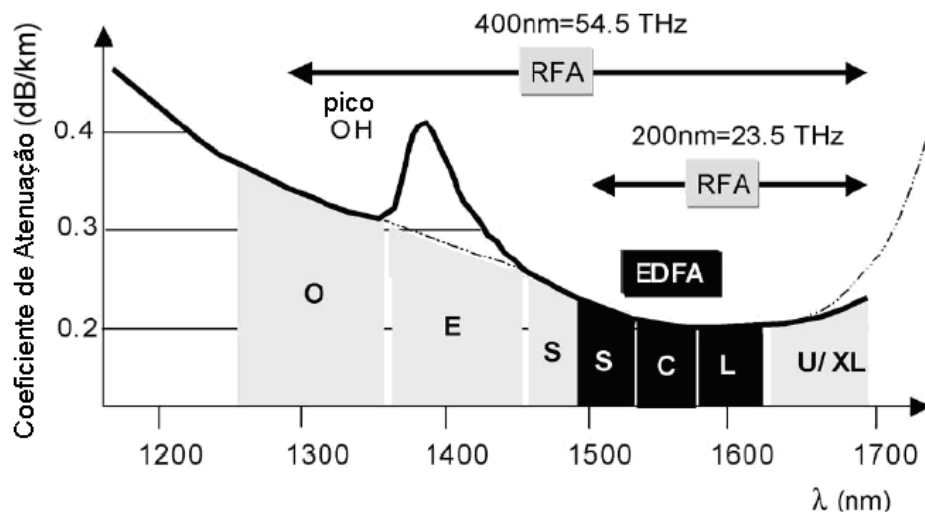


Figura 1.3. 3- Atenuação versus comprimento de onda (λ) de uma fibra óptica padrão e as bandas padronizadas (O, E, S, C, L e U/XL). [24]

Neste contexto, este trabalho vai analisar e comparar alguns dos formatos de modulação usados em sistemas de fibras ópticas. Tais sistemas serão simulados no programa VPIsystemsTM, e apenas se alterará o formato de modulação, mantendo-se outros parâmetros dos sistemas ópticos inalterados, de modo a ser possível extrair deste estudo as capacidades inatas de cada formato de modulação para a transmissão de dados.

Entre os parâmetros inalterados estão a potência óptica dos lasers (1 mW), *extinction ratio* dos moduladores Mach-Zehnder (20 dB), o parâmetro de dispersão e PMD das fibras ($16.7 \text{ ps/nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, $2 \times 10^{-12} / 31.62 \text{ s/m}^{-1/2}$, todas elas SSMF), o fotodetector (PIN) usado nos casos de detecção directa, nomeadamente o seu ruído térmico ($1.8 \times 10^{-11} \text{ AHz}^{-1/2}$) e o filtro de pós-deteção também para o caso de detecção directa (filtro de Bessel de quarta ordem com uma largura de banda de 75% do ritmo de transmissão simulado).

1.4 – Estrutura e objectivos

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos. No Capítulo 1 faz-se uma primeira abordagem às comunicações ópticas apresentando o contexto histórico destas e uma breve revisão do estado da arte. Apresenta-se ainda a motivação para este trabalho.

No capítulo 2 é feita a revisão dos principais factores limitadores da transmissão num sistema óptico dando relevância aos efeitos lineares, nomeadamente atenuação, dispersão e dispersão por modos de polarização.

No capítulo 3 apresenta-se a classificação de alguns dos formatos de modulação mais relevantes e são apresentados e descritos os formatos de modulação simulados neste trabalho. São o NRZ-OOK, RZ-OOK, Duobinário, NRZ-VSB, QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM. É ainda apresentado o esquema dos transmissores e receptores usados para cada um dos formatos de modulação acima referidos.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados das diversas simulações efectuadas. Apresenta-se a caracterização espectral dos formatos, através dos respectivos espectros ópticos (à saída do transmissor) e diagramas de olho ou constelações, bem como a penalidade de potência dos mesmos sendo feitas comparações entre os resultados obtidos para cada um dos formatos. Apresenta-se resultados para a dispersão cromática acumulada para uma penalidade de 2dB de modo a que melhor possam ser feitas estas comparações e ainda resultados para a penalidade de potência em função do espaçamento entre canais para um sistema WDM de 8 canais.

No capítulo 5 são expostas as principais conclusões deste trabalho e feitas sugestões para futuros trabalhos de modo a continuar e aprofundar o estudo do comportamento de desempenho dos principais formatos de modulação em situações cada vez mais completas e mais próximas da realidade.

1.5 – Contribuições

Na opinião do autor, as principais contribuições científicas do trabalho realizado nesta dissertação prendem-se com:

- Melhor compreensão das principais características dos formatos de modulação considerados.
 - Melhor compreensão dos efeitos lineares das fibras ópticas e o seu impacto limitador na transmissão.
-
-

Capítulo 2 – Sistemas ópticos: Principais factores lineares limitadores da transmissão

Quando há necessidade de elevadas da taxa de transmissão dos sistemas ópticos, algumas características e problemas das fibras ópticas e da rede que, até então não eram significativos, tornam-se críticos. Desta forma, os sistemas de modulação precisam ser resistentes aos ruídos dos amplificadores ópticos; ser robusto à dispersão cromática, dispersão dos modos de polarização e com os efeitos não lineares das fibras ópticas além de serem de fácil adição e retirada de dados ao longo do caminho. [23-27]

2.1 – Atenuação

A transmissão de sinais ao longo de grandes distâncias implica uma atenuação significativa da potência do sinal ao longo do percurso. As fibras ópticas monomodo possuem coeficientes de atenuação da ordem de 0,2dB/km, conforme fig. 2.1.1, para um comprimento de onda (λ) na ordem de 1550nm. [24]

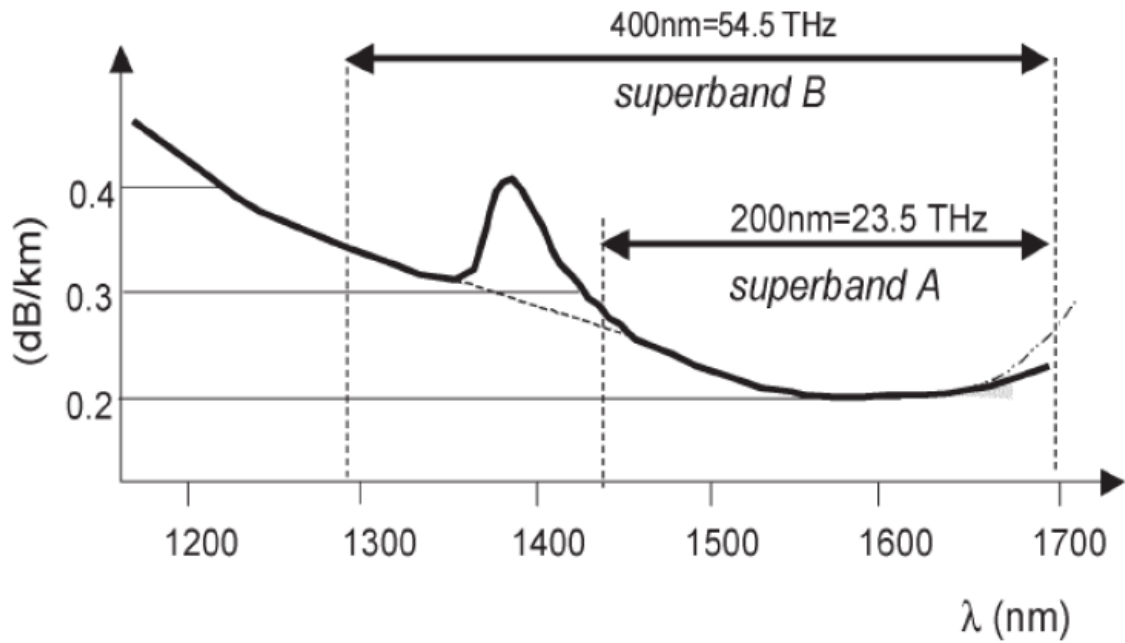


Figura 2.1. 1 - Atenuação de uma fibra óptica monomodo padrão em função do comprimento de onda (λ), e a indicação das super-bandas A e B. [24]

A figura 2.1.1 mostra que a variação da atenuação com o comprimento de onda (λ) não é linear.

A atenuação é um dos mais importantes parâmetros na caracterização de uma fibra. Quando um qualquer sinal óptico é transmitido pela fibra, parte da sua potência é perdida devido à absorção do material e à dispersão Rayleigh. A expressão da perda de potência é apresentada na equação abaixo:

$$P_R = P_0 \cdot e^{-\alpha L} \quad (1)$$

onde: α é a constante de atenuação; P_0 é a potência de entrada na fibra óptica de comprimento L ; e P_R é a potência recebida. Normalmente a atenuação da fibra é expressa em dB/km de acordo a seguinte expressão:

$$\alpha_{dB} = -\frac{10}{L} \log\left(\frac{P_R}{P_0}\right) = 4,343 \cdot \alpha \quad (2)$$

A atenuação da fibra α (dB) é dependente do comprimento de onda. A figura 2.1.1 mostra a curva característica de uma fibra monomodo padrão - SSMF (*Standard Single-Mode Fiber*).

A curva tracejada mostra a perda intrínseca resultantes da dispersão de Rayleigh e a absorção da sílica pura.

Desta forma, na ordem de dezenas de quilómetros, serão necessários elementos amplificadores ou até regeneradores do sinal. Assim conclui-se que a atenuação é um factor limitador da transmissão, pois quanto maior for a atenuação de um sinal menor será a potência óptica recebida e, para uma mesma taxa de erro, maior terá de ser a sensibilidade do receptor. Uma modulação mais robusta pode permitir aumentar o espaçamento entre os amplificadores (ou regeneradores), ou pode conferir ao sistema uma maior imunidade ao ruído introduzido pelos mesmos.

2.2 - Dispersão

A dispersão cromática (CD) (ou “*Chromatic Dispersion*”) produz um alargamento temporal do sinal óptico, como é observada na figura 2.2.1. A dispersão cromática altera a velocidade da propagação para os diversos componentes espectrais contidos num sinal óptico modulado, provocando deste modo, no domínio do tempo, um alargamento do impulso transmitido. [23,25]



Figura 2.2. 1 - A velocidade da propagação para os diversos componentes espectrais do sinal transmitido é diferente devido à dispersão cromática resultando num sinal “alargado” temporalmente e com menor amplitude no receptor.

O fenómeno da dispersão cromática baseia-se na variação do índice de refração com a frequência $n(\omega)$. Como a velocidade de fase é determinada por $c/n(\omega)$, as diferentes componentes espectrais associadas ao impulso, terão velocidades de fase diferentes. A propagação de componentes com velocidades ligeiramente diferentes causa o alargamento do impulso, ilustrado na fig.2.2.2. A CD é, normalmente expressa em $\text{ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$. Esta medida representa o atraso temporal medido em picosegundos por cada nanómetro de largura espectral do emissor e por cada quilómetro de fibra. [23,26,27]

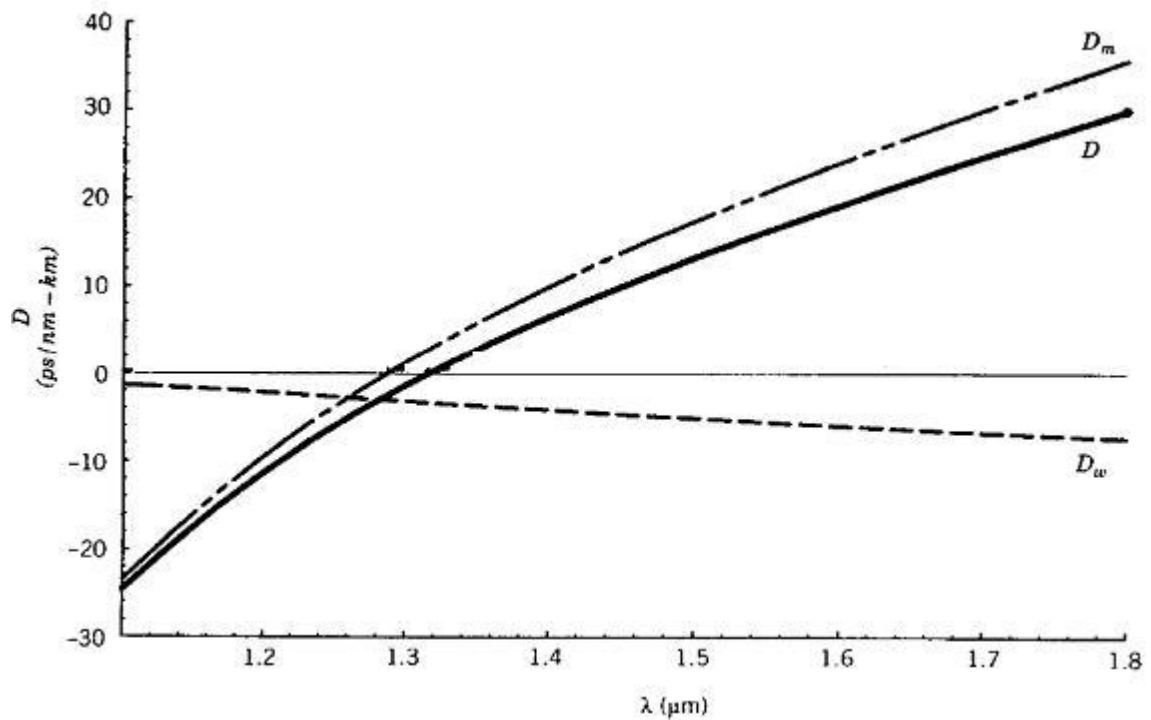


Figura 2.2. 2 - Dispersão cromática (CD) de uma fibra monomodo padrão SSMF (Standard Single-Mode Fiber) indicada pela curva D, onde $D=D_m + D_w$; D_m = Dispersão do material; D_w = Dispersão do guia de onda. [28]

A dispersão cromática é a soma de três componentes de dispersão. A dispersão material (D_m), dispersão do guia de onda (D_w), como se mostra na figura 2.2.2 A dispersão material decorre da alteração no índice refração com a alteração do comprimento de onda da sílica, e é pouco afectada pela dopagem da fibra. A dispersão do guia de onda, advém da geometria do guia de onda, desempenhando um papel crítico na propagação de impulsos curtos com diferentes componentes espectrais associados. Isto porque as componentes espectrais do impulso viajam em velocidades diferentes, tal como ilustrado na figura 2.2.1, e desta forma, o impulso óptico é alargado no final da fibra.

A equação para a evolução de um campo óptico $E(z,t)$, representando um sinal óptico modulado que se propaga segundo o eixo z numa fibra óptica com dispersão é dada pela equação:

$$\frac{\partial E}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_2(z)\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - \frac{1}{6}\beta_3(z)\frac{\partial^3 E}{\partial t^3} + \frac{\alpha(z)}{2}E = 0 \quad (3)$$

onde $\alpha(z)$ é o coeficiente de atenuação da fibra óptica; $\beta_2(z)$ é a dispersão da velocidade de grupo GVD (*Group Velocity Dispersion*) e representa a mudança da velocidade de grupo com a frequência angular ω ; $\beta_3(z)$ indica a alteração da GVD com a frequência angular ω .

Considerando uma fibra monomodo de comprimento L , uma componente espectral à frequência ω chegará ao final do percurso após um tempo $T = L/v_g$, onde v_g é a velocidade de grupo definida anteriormente.

$$v_g = (d\beta/d\omega)^{-1} \quad (4)$$

Usando $\beta = \bar{n}k_0 = \bar{n}\omega/c$ na equação anterior, demonstra-se que $v_g = c/\bar{n}_g$ onde \bar{n}_g é o índice de grupo dado por:

$$\bar{n}_g = \bar{n} + \omega(d\bar{n}/d\omega) \quad (5)$$

A dependência da velocidade de grupo conduz a um alargamento do impulso pois diferentes componentes espectrais de um impulso sofrem diferentes dispersões durante a propagação provocando um atraso temporal distinto nas diferentes componentes espectrais. Seja $\Delta\omega$ a largura espectral do impulso, a extensão do alargamento do mesmo para uma fibra de comprimento L é dada por:

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega = L\beta_2 \Delta\omega \quad (6)$$

O parâmetro $\beta_2 = d^2\beta/d\omega^2$ é conhecido como GVD e determina o alargamento do impulso no interior da fibra.

Na maior parte dos sistemas de comunicação, $\Delta\omega$ é determinado pelo espectro de comprimentos de onda ($\Delta\lambda$) emitidos pela fonte óptica. Assim, usando $\omega = 2\pi c/\lambda$ e $\Delta\omega = (-2\pi c/\lambda^2)\Delta\lambda$, a equação 6 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta T = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{L}{v_g} \right) \Delta\lambda = DL\Delta\lambda \quad (7)$$

Onde

$$D = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (8)$$

D é o parâmetro de dispersão, usualmente expresso em ps/(nm.km).

A equação 7 mostra uma relação proporcional entre o alargamento de um impulso e a dispersão bem como o comprimento da fibra e largura espectral da fonte. Como o alargamento de um impulso está directamente relacionado como a interferência entre símbolos (IES), pois quanto maior for o alargamento, maior será a interferência de um

símbolo transmitido com o próximo, então a IES estará directamente relacionada com a dispersão.

Para estimar o efeito da dispersão no ritmo de transmissão B , é comum usar o critério $B\Delta T < 1$. Usando ΔT da equação (7) esta condição será $BL|D|\Delta\lambda < 1$.

Esta equação oferece uma noção do produto BL disponível pelas fibras monomodo, onde se observa a sua dependência da dispersão bem como da largura espectral da fonte. Os formatos de modulação desempenham, neste aspecto, um papel fundamental pois podem conferir a um sistema óptico uma maior robustez face a este fenómeno. Note-se que quanto menor for a largura espectral da fonte (parâmetro relacionado com o formato de modulação) maior poderá ser o produto BL , ou seja, maior poderá ser o ritmo de transmissão e a distância às quais um determinado sistema pode transmitir.

2.3 - Dispersão dos modos de polarização - PMD (Polarization-Mode Dispersion)

Devido à sua simetria circular, o único modo de propagação transversal existe em dois modos degenerados de polarização, que têm propriedades idênticas de propagação. Na realidade, devido a mínimas assimetrias do guia de onda, por imperfeições durante o fabrico, pelas tensões impostas durante a instalação, vibrações mecânicas ou variações térmicas, resultam em dois modos de propagação da fibra monomodo [23]. Assim a PMD tem suas origens na birrefringência. Embora as fibras ópticas denominadas de monomodo (modo de propagação único), existem na verdade, dois modos ortogonalmente polarizados. Considerando a propagação de um impulso na fibra, pode-se distinguir entre os dois eixos ortogonais de polarização, chamados de estados principais de polarização ou PSP (*Principal State of Polarization*) [26]. Os PSPs resultam em diferentes velocidades de grupos, dando origem a um DGD (*Differential Group Delay*), visualizada na figura 2.3.1, e a DGD acaba por gerar um alargamento do impulso após a detecção eléctrica do sinal óptico. O sinal eléctrico é dado pela soma das potências de sinal em ambas as polarizações (x e y), de acordo com a equação abaixo, e devido ao DGD, existe um atraso de uma

polarização em relação à outra e este fenómeno é chamado de dispersão dos modos de polarização ou PMD.

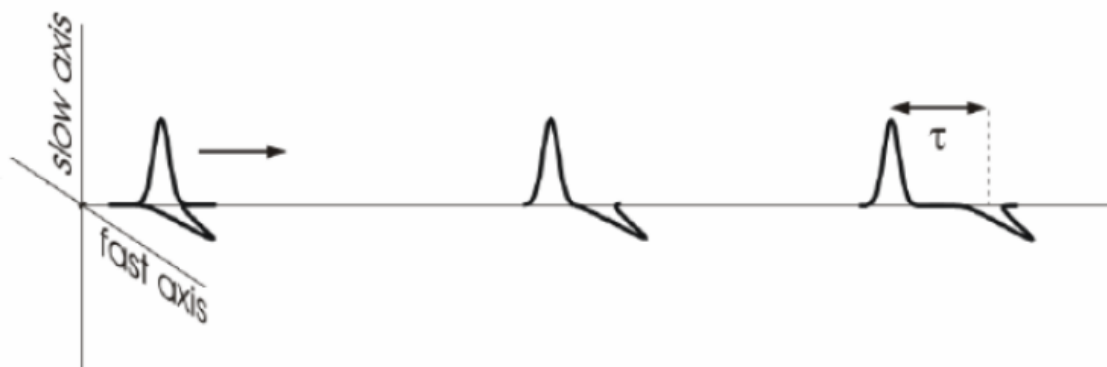


Figura 2.3. 1 - Exemplo de DGD (Differential Group Delay), a propagação em cada eixo ocorre em velocidades distintas resultando num atraso entre os sinais em propagados em cada eixo. [26]

2.4 – Efeitos Não-Lineares

Os efeitos não lineares são, hoje em dia, no contexto dos sistemas de comunicação óptica, uma das principais preocupações e tema de grande investigação tanto ao nível do estudo dos seus efeitos como ao nível da mitigação desses mesmos efeitos.

No entanto, os efeitos não lineares não são objecto de estudo deste trabalho e por conseguinte, apenas se fará uma breve referência a estes.

Devido ao alto confinamento da luz no interior do núcleo de uma fibra monomodo, existirá uma grande intensidade óptica no interior da fibra, podendo a chegar exceder $1\text{MW}/\text{cm}^2$. Estas altas intensidades induzem mudanças no índice de refração da fibra. Este efeito é denominado de efeito Kerr ou não linearidade Kerr. [23,25]

Dos efeitos não-lineares mais importantes destacam-se a SPM (*Self-Phase Modulation*) e XPM (*Cross-Phase Modulation*). Estes efeitos afectam a fase do sinal e causam um alargamento espectral que resulta numa distorção temporal devido à dispersão.

A SPM e XPM são efeitos que ocorrem devido à dependência do índice de refração da potência do sinal óptico transmitido. A dependência do índice de refração em função da

intensidade óptica de forma não linear provoca a mudança de fase enquanto o sinal é propagado através de uma fibra óptica. Se a intensidade óptica não é uniforme ao longo do caminho de propagação, a mudança induzida na fase também não é uniforme. Este desfasamento não uniforme pode ser tratado como uma modulação de fase, e causa alargamento do espectro de potência.

A FWM (*Four Wave Mixing*) também um dos mais importantes fenómenos não lineares que ocorre quando dois ou mais comprimentos de onda se propagam numa mesma fibra óptica e satisfazem algumas condições. Este efeito torna-se mais significativo quando os comprimentos de onda estão próximos do comprimento de onda de dispersão zero da fibra óptica e quando o espaçamento entre os canais é muito pequeno. [26-27]

Supondo três frequências ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$) que se propagam na mesma fibra óptica, então uma nova frequência (ω_{123}) será gerada, sendo esta dada pela expressão [27]:

$$\omega_{123} = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3 \quad (9)$$

N comprimentos de onda propagando-se na mesma fibra produzirão M frequências adicionais através do FWM, de acordo com a equação abaixo:

$$M = \frac{1}{2}(N^3 - N^2) \quad (10)$$

O espalhamento estimulado de Raman, SRS (*Stimulated Raman Scattering*) e o espalhamento estimulado de Brillouin, SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*) são produzidos pelo espalhamento inelástico estimulado em que o campo óptico transfere parte da energia do sinal óptico para um meio não linear. [26-27]

A ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) é um problema comum nos sistemas ópticos, ao qual, os sistemas de modulação devem ser mais imunes e robustos possíveis. Este efeito representa, para o sistema, ruído Gaussiano e com a propagação na fibra e passagem por amplificadores ópticos, este ruído acaba por ser amplificado e as suas características alteradas. [23, 25]

A ASE é gerada essencialmente nos EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*). Esta situação amplifica o ruído de emissão espontânea adicionado ao sinal e assim degrada a relação sinal-ruído no sistema de comunicação óptica como um todo. [26]

Capítulo 3 – Modulação

Capítulo 3.1 – Formatos de modulação

A modulação do laser pode ser efectuada de 3 formas para o transporte de informações: intensidade, fase ou frequência, e polarização. Isto não implica que o sinal não possa ser modulado com mais de um tipo de modulação ao mesmo tempo, por exemplo, pode-se modular a intensidade e a fase simultaneamente.

Nos sistemas ópticos a portadora do sinal será a luz do laser em um determinado comprimento de onda λ e o sinal de informação a ser transmitido será um sinal digital. [29] O número de bits representados por cada estado do sistema de modulação é mais um parâmetro do sistema de modulação que pode ser manipulado de modo a melhorar a performance do sistema. Assim cada conjunto de n bits é representado por um código específico do modulador reduzindo a taxa de transmissão de cada símbolo.

Outra característica da modulação é a forma como o impulso de modulação é formatado com sinais do tipo RZ (“*Return-to-Zero*”) ou NRZ (“*Non Return-to-Zero*”).

O NRZ caracteriza-se por não retornar ao nível zero a cada bit. Esta transição ocorre apenas quando existe uma transição de um bit “1” para um bit “0”. No caso do RZ para cada bit “1” o sinal retorna para zero antes da transmissão do próximo bit, independentemente, deste ser “0” ou “1”. [23, 25]

Existem variações dos tipos RZ e NRZ que podem ser obtidas de adaptações dos tipos RZ e NRZ unipolar (Fig.3.2) tais como: a polar, bipolar entre outras. [29]

Na Fig.3.1.1 é observada a evolução e a origem dos principais sistemas de modulação óptica (modulação de intensidade ou fase).

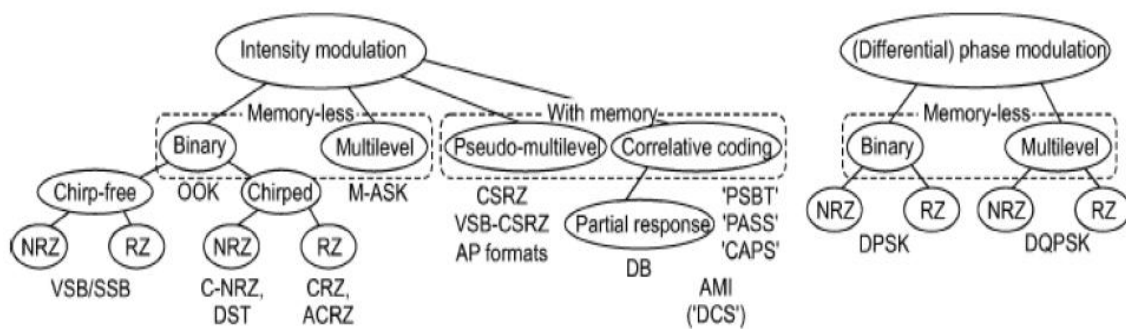


Figura 3.1. 1 - Evolução e origem dos principais formatos de modulação. [23]

Neste trabalho serão abordados os NRZ-OOK (*Non-Return-to-Zero On/Off Keying*), RZ-OOK (*Return-to-Zero On/Off Keying*), Duobinário, NRZ-VSB (*Vestigial Side Band*), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*), DQPSK (*Diferential Phase Shift Keying*) bem como 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*).

3.1.1 - Formatos de modulação em intensidade

Nesta secção serão introduzidos os formatos de modulação em intensidade estudados neste trabalho. São eles, NRZ-OOK, RZ-OOK, Duobinário e NRZ-VSB.

- **NRZ-OOK (*Non-Return-to-Zero On/Off Keying*)**

A mais simples modulação é conhecida por NRZ-OOK (*Non Return-to-Zero On/Off Keying*) ou NRZ e pode ser observada na Fig.3.1.1.1.

A modulação NRZ tem sido o formato de modulação dominante em sistemas de comunicação nos últimos anos. As principais razões para a utilização da modulação NRZ, no início dos sistemas de fibra óptica foram: a) NRZ não é sensível ao ruído de fase do laser em comparação com PSK; b) a NRZ requer menor largura de banda eléctrica para os transmissores e receptores, em comparação com o RZ; c) possui a configuração mais simples do transmissor e do receptor. [26-27]

O diagrama de um transmissor NRZ-OOK é mostrado na figura 3.1.1.1, onde sinal eléctrico é modulado com um modulador externo. O modulador pode ser do tipo Mach-

Zehnder ou eletro-absorção, que converte um sinal eléctrico NRZ-OOK num sinal óptico, cuja taxa de transmissão é igual à taxa do sinal eléctrico [26-27]. Para a detecção de um sinal óptico modulado com NRZ-OOK, um simples fotodíodo é utilizado no receptor, que converte sinais ópticos em corrente eléctrica. Isto é conhecido como detecção directa (DD).

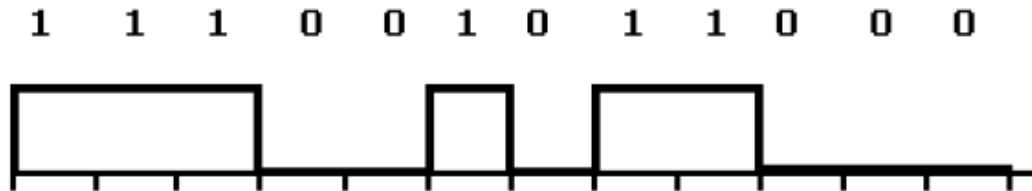


Figura 3.1.1. 1 - Sinal com modulação NRZ

- **RZ-OOK (*Return-to-Zero On/Off Keying*)**

Outra modulação muito conhecida é o RZ-OOK (*Return-to-Zero On/Off Keying*) ou simplesmente RZ. A modulação RZ-OOK é similar a NRZ-OOK com a diferença de que a cada bit “1” o sinal retorna para zero antes da transmissão do próximo bit independentemente deste ser “0” ou “1”. [23]

A principal característica dos sinais modulados em RZ é de possuir espectros ópticos mais amplos, comparativamente à modulação NRZ-OOK. Esta característica é devido ao retorno a zero de cada bit “1”, que resulta numa redução da tolerância à dispersão e uma reduzida eficiência espectral. No entanto estas mesmas causas resultam também numa maior tolerância às não-linearidades e à PMD. [26-27]

Os sinais modulados em RZ-OOK podem ser implementados electronicamente, gerando para o efeito, sinais eléctricos RZ que modulam uma portadora óptica directamente, ou sinais ópticos modulados em NRZ aplicados a um modulador adicional denominado “*pulse carver*”, resultando num sinal óptico modulado em RZ, conforme se pode ver na figura 3.1.1.2.

O “*pulse carver*” pode ser convenientemente implementado com o MZM ou EAM. A modulação RZ é normalmente executada usando o “*pulse carver*” baseado no MZM. [23]

O princípio de funcionamento do “*pulse carver*” é simples. Este recebe um sinal óptico contínuo, por exemplo, um sinal NRZ-OOK, e gera impulsos ópticos RZ numa determinada taxa de transmissão, ou seja, é utilizado para esculpir impulsos RZ de um

sinal óptico. Este princípio de funcionamento é executado a partir de um MZM que é controlado por uma onda sinusoidal esculpindo o impulso óptico [23]. A detecção do sinal modulado no formato RZ pode usar a mesma detecção usada para a modulação NRZ convencional.

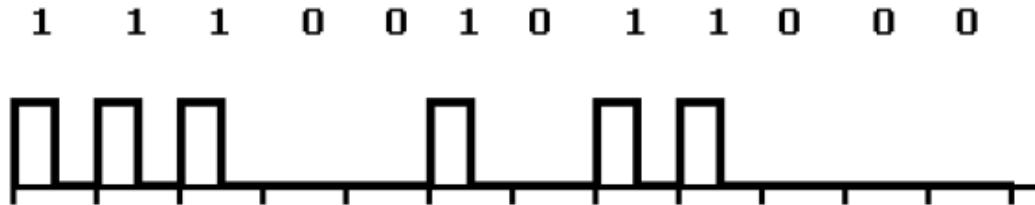


Figura 3.1.1. 2 - Sinal com modulação RZ

- **Duobinário - DB (*Duobinary*)**

O formato de modulação Duobinário (DB) tem sido alvo de grande atenção nos últimos anos. As duas grandes vantagens deste formato prendem-se com a sua maior tolerância à dispersão cromática e maior eficiência espectral quando comparado com o NRZ ou RZ. [30-31]

O conceito base da modulação DB é a de provocar intencionalmente interferência entre símbolos (IES) ao sobrepor dados de bits adjacentes. A correlação entre bits sucessivos num sinal binário irá implicar um espectro óptico mais estreito. Tal, é feito adicionando uma sequência de dados a uma versão de si mesmo atrasada de 1 bit, que é obtida passando o sinal binário através de um filtro *delay-and-add* (figura 3.1.1.3a). Isto é, se a sequência de entrada binária for $x(nT)=(0, 0, 1, 1, 0, 1)$ a sequência de saída será $y(nT)=(0, 0, 1, 2, 1, 1)$ como se pode constatar pela operação abaixo.

$$\begin{array}{r}
 + \quad 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \\
 * \quad 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \\
 \hline
 0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1
 \end{array}$$

Note-se que o primeiro bit da sequência atrasada (*) é sempre considerado '0'.

Assim, se $x(nT)$ for a entrada e $z(nT)$ for a entrada atrasada de 1 bit $z(nT)=x(nT-T)$ e por conseguinte $y(nT)=x(nT)+z(nT)=x(nT)+x(nT-T)$, onde T é o período do bit e n é o

número de sequências de bits (no exemplo dado $n=6$) . É de destacar ainda que enquanto a sequência de entrada é binária, a sequência de saída é ternária.

No entanto, este esquema de modulação sofre de um grave problema. Apenas um erro na transmissão causará um erro em todos os bits seguintes até que um outro erro ocorra e corrija o erro anterior.

A solução para este problema é codificar os dados de uma forma diferencial. Caso $x(nT)$ seja incorrectamente codificado e sequências de bits estiverem erradas, a sua diferença continuara correcta. Contudo este método não beneficia da vantagem de uma largura espectral reduzida como o anterior. Esta vantagem pode apenas existir usando sinais ternários.

A primeira versão do DB, aumenta a penalidade de sensibilidade [31]. De modo a evitar esta desvantagem os sinais de ternários do DB terão de ser codificados em amplitude e fase [32]. Este método é conhecido como AM-PSK, sendo a maioria dos estudos actuais sobre o formato DB baseados no AM-PSK.

Neste esquema os dados são codificados de modo diferencial antes do filtro do DB, e por isso, a informação contida na fase da portadora óptica torna-se redundante. Daí, os dados poderem ser decodificados usando um detector de detecção directa convencional. Este sinal DB pode ser gerado usando um sinal ternário em banda base aplicado a um *dual-drive MZM* (figura 3.1.1.3b) que pode ser polarizado no ponto de máximo *extinction ratio* (figura 3.1.1.3c) [32]. Assim, com este esquema (AM-PSK), o DB preserva a sua vantagem de reduzida largura espectral.

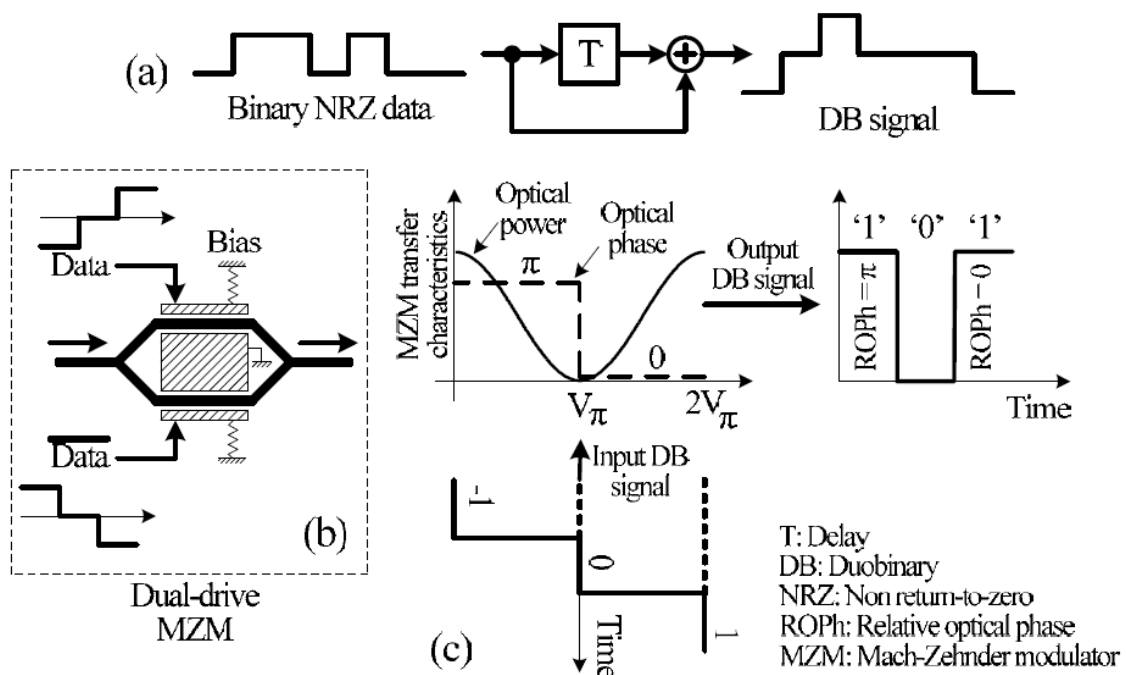


Figura 3.1.1. 3 – Geração do sinal DB, (a) filtro digital para o sinal eléctrico DB, (b) dual-drive MZM, (c) Polarização do MZM e condições para o sinal DB óptico. [33]

Conceptualmente a portadora é uma sinusóide cujo comportamento pode ser descrito por $a.\cos(\omega t)$. Os três níveis do sinal ternário correspondem a $-a.\cos(\omega t) = a.\cos(\omega t + \pi)$, $0 = 0$, $\cos(\omega t)$ e $\cos(\omega t)$, o que corresponde a -1, 0 e 1 que, por sua vez correspondem aos níveis 0, 1 e 2 respectivamente.

- **NRZ-VSB (*Vestigial Side Band*)**

Em muitos formatos de modulação, são necessários dois moduladores. Um destes para o gerar o formato NRZ ou RZ e o outro para supressão da portadora e modulação de fase (dependendo do formato de modulação em causa). No formato de modulação VSB é normalmente usado um filtro óptico para filtrar a banda indesejável.

Em sistemas WDM, a filtragem da pode ser feita no transmissor (antes ou com a multiplexagem dos canais WDM) ou no receptor (depois ou com a demultiplexagem). A filtragem no transmissor permite uma maior compressão espectral e transmissões espectralmente mais eficientes. No entanto, se a filtragem for efectuada no receptor, numa

situação WDM, o crosstalk em WDM para a banda desejada é reduzido caso o espaçamento entre canais seja desigual.

Para geração do VSB, podem ser usados os formatos NRZ ou RZ. No entanto o formato NRZ trás maiores vantagens no domínio da tolerância à dispersão, pois ocupa metade da largura espectral quando comparado com o RZ.

A modulação VSB permite a existência de uma fração da banda indesejável à saída do modulador. Em vez de eliminar a totalidade desta banda, este formato de modulação elimina a maior parte desta (mas não completamente) implementando um filtro óptico no sinal DSB (*Dual Side Band*). Com esta técnica, a dificuldade da criação de um “*sharp cut-off*” é ultrapassada.

O princípio básico da filtragem VSB é mostrado na figura 3.1.1.4 e 3.1.1.5

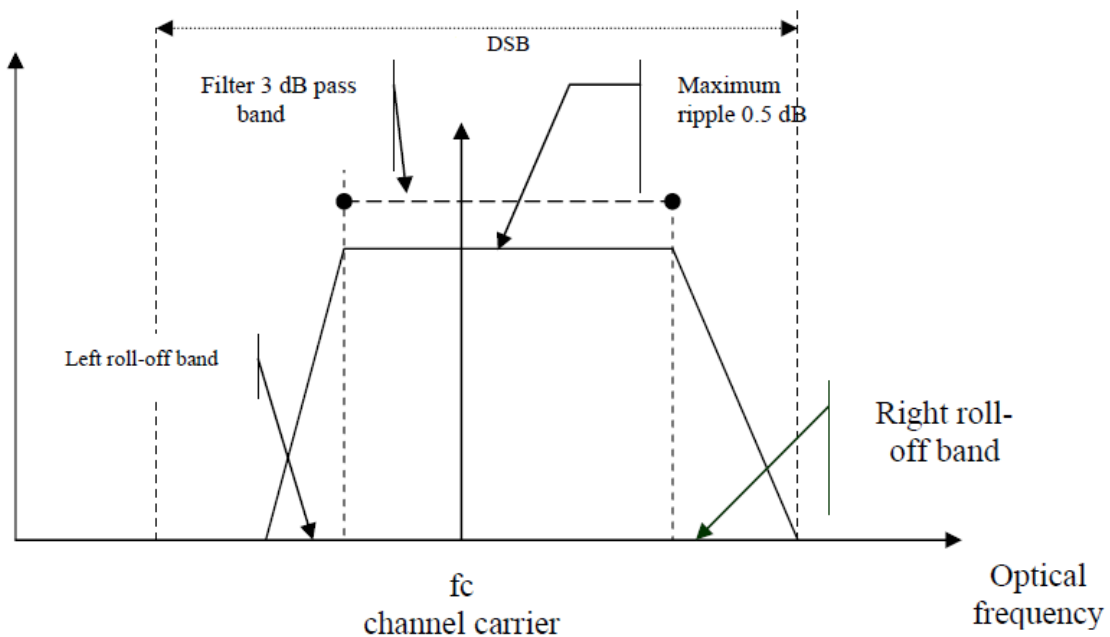


Figura 3.1.1. 4 - Detalhes do filtro óptico VSB.

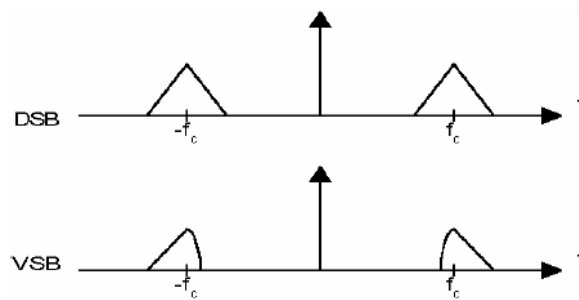


Figura 3.1.1. 5 - Propriedades espectrais da modulação VSB comparado com as de um DSB.

3.1.2 – Formatos de modulação em fase

Nesta secção serão introduzidos os formatos de modulação em fase estudados neste trabalho. São eles, QPSK e DQPSK.

- **QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) e DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*)**

A modulação QPSK é uma técnica de modulação derivada do PSK (Phase Shift Keying). O PSK é uma forma de modulação em que a informação do sinal digital é embutida nos parâmetros de fase da portadora. Neste sistema de modulação, quando há uma transição de um bit 0 para um bit 1 ou de um bit 1 para um bit 0, a onda portadora sofre uma alteração de fase. Quando estas transições não existem, ou seja, quando bits seguintes são iguais, a portadora continua a ser transmitida com a mesma fase.

Esta variação de fase em função da transição de bit do sinal é ilustrada na figura 3.1.2.1.

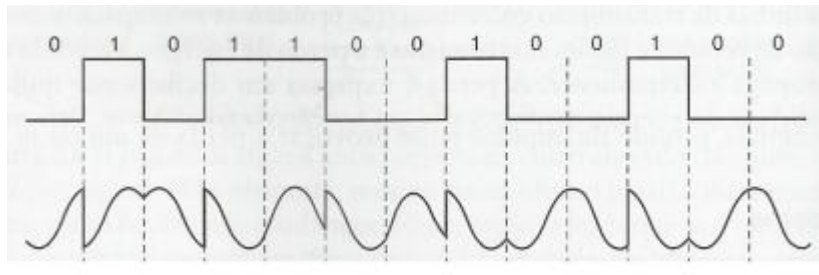


Figura 3.1.2. 1 - Sinal com modulação PSK

No entanto, no caso do QPSK, são utilizados parâmetros de fase e quadratura da onda portadora para modular o sinal de informação. Como agora são utilizados dois parâmetros, existem mais tipos possíveis de símbolos nesta constelação, o que permite que sejam transmitidos mais bits por símbolo. Por exemplo, se forem transmitidos dois bits por símbolo, ao invés de um bit por símbolo como no caso PSK acima, neste caso, como teremos 4 tipos de símbolos possíveis, a portadora pode assumir 4 valores de fase diferentes, 0 , $+\pi/2$, $-\pi/2$ e π .

Este formato opera a um ritmo de símbolos igual a metade do bit rate agregado. A figura 3.1.2.2 mostra um esquema do DQPSK que consiste num laser *continuous wave* (CW), um *splitter* que divide a luz em dois feixes de igual intensidade, dois MZMs que actuam como moduladores de fase (PM), um *shifter* óptico de fase de $\pi/2$ (em um dos caminhos) e um *power combiner* para produzir um sinal de saída único.

No receptor, o sinal DQPSK divide-se em duas partes e é detectado por dois receptores balanceados (figura 3.1.2.3). Estes dois receptores são usados em paralelo de modo a demodularem simultaneamente as duas sequências de dados binários contidos no sinal DQPSK. A estrutura de recepção do QPSK e DQPSK também pode ser efectuada através de receptores híbridos. Alias é essa a estrutura usada nas simulações efectuadas (uma breve descrição desta estrutura encontra-se na secção 3.2)

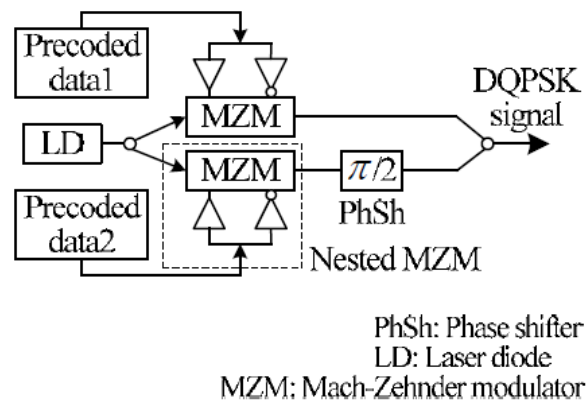


Figura 3.1.2. 2 – Transmissor DQPSK

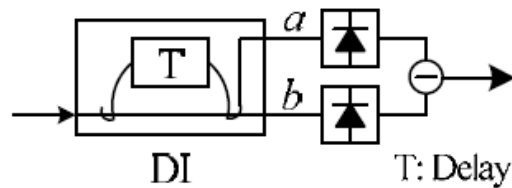


Figura 3.1.2. 3 - Receptor balanceado

Note-se que o atraso introduzido pelo *delay interferometer* (DI) tem de ser igual à duração do símbolo para a demodulação DQPSK. Esta duração é o dobro da duração do bit. Tipicamente para o QPSK e DQPSK é necessário o ajuste do feedback do DI. [23]
A figura 3.1.2.4 mostra um exemplo de um sinal QPSK/DQPSK. Os sinais modulados QPSK e DQPSK são idênticos, a diferença reside no codificador. Caso este não seja diferencial, o formato será QPSK. Caso seja diferencial então o formato será DQPSK.

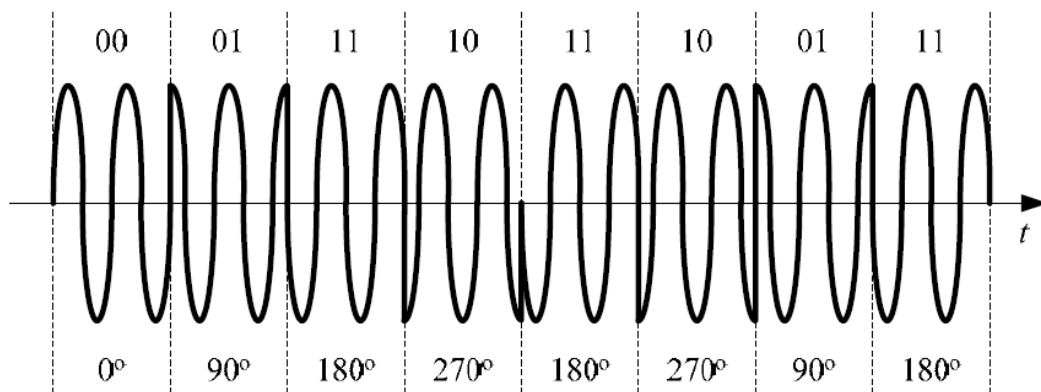


Figura 3.1.2. 4 - Sinal com modulação QPSK/DQPSK

3.1.3 – Formatos de modulação em amplitude e fase

Nesta secção será introduzido o formato de modulação em amplitude e fase estudado neste trabalho. E este o M-QAM. Nomeadamente o 16-QAM e 64-QAM.

- **M-QAM (Multilevel Quadrature Amplitude Modulation)**

Neste formato de modulação, os símbolos são mapeados num diagrama de fase e quadratura, no qual, cada símbolo apresenta uma distância específica da origem do diagrama que representa a sua amplitude, diferentemente da modulação PSK, na qual todos os símbolos estão a igual distância da origem. Isto significa que as informações são inseridas nos parâmetros de amplitude e quadratura da onda portadora.

No caso do 16-QAM, a constelação apresenta 16 símbolos, sendo 4 em cada quadrante do diagrama, o que significa que cada símbolo representa 4 bits. Podemos ter também, por exemplo, o modo 64-QAM, cuja constelação apresenta 64 símbolos, cada um deles representando 6 bits. A figura abaixo mostra as constelações geradas pelos dois modos QAM mencionados acima:

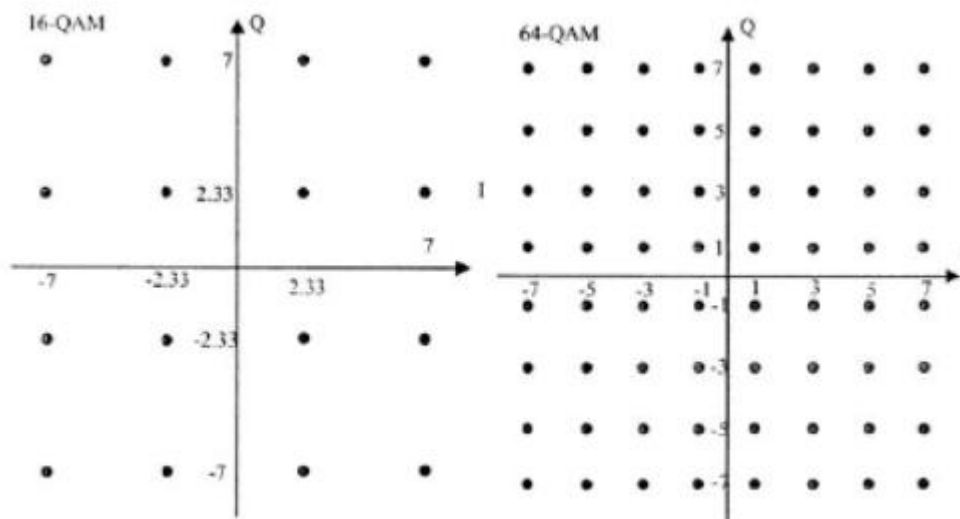


Figura 3.1.3. 1- Esquema das constelações do 16-QAM e 64-QAM

Pode-se notar que no modo 16-QAM alcança-se uma taxa de transmissão menor do que no modo 64-QAM, uma vez que cada símbolo transporta um número menor de bits. No

entanto, no modo 16-QAM, a distância euclidiana entre os símbolos é maior do que no caso do modo 64-QAM. Isto permite que o modo 16-QAM possibilite uma melhor qualidade de serviço, pois a maior distância entre os símbolos dificulta erros de interpretação no receptor quando este detecta um símbolo.

3.2 – Emissão e recepção

Nesta secção serão apresentadas esquematicamente as estruturas usadas para a emissão e recepção do sinal para os diversos formatos de modulação estudados.

- **NRZ-OOK**

Para a emissão do NRZ-OOK foi usada a topologia apresentada na figura 3.2.1.

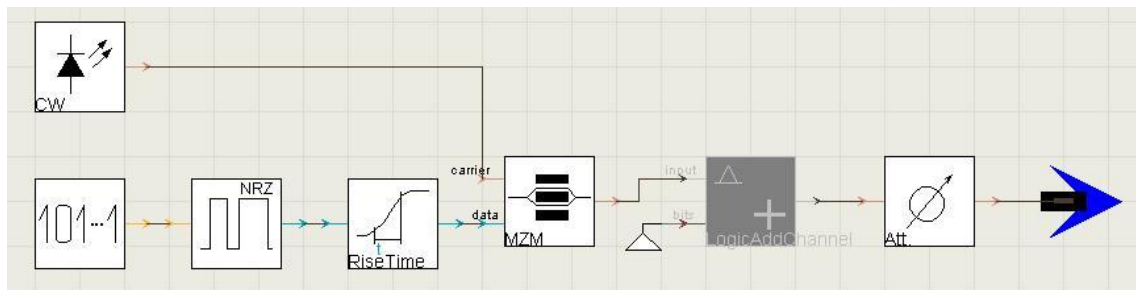


Figura 3.2. 1 - Esquema do emissor NRZ

Esta topologia consiste num laser CW (Continuous Wave), uma sequência pseudo-aleatória de bits (PRBS), um codificador NRZ e um filtro gaussiano para ajustar os impulsos do codificador ajustando o tempo de subida do sinal (*rise time*).

Os sinais do laser e sequência codificada são introduzidos num modulador Mach-Zehnder que modulará o sinal pretendido. O bloco seguinte é usado para efeitos de simulação (adiciona um canal lógico de modo a que o receptor possa ter acesso ao sinal original de modo a poder calcular as taxas de erro). Finalmente, é colocado à saída um atenuador embora, para todas as simulações apresentadas, este esteja a atenuar o sinal em 0dB.

- **RZ-OOK**

Para a emissão do RZ-OOK foi usada a topologia apresentada na figura 3.2.2.

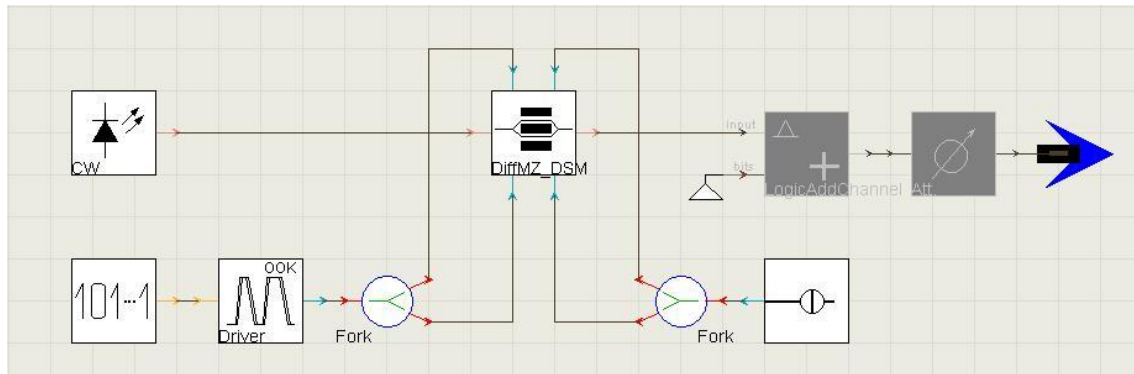


Figura 3.2. 2 - Esquema do emissor RZ

Esta topologia consiste num laser CW (Continuous Wave), uma sequência pseudo-aleatória de bits (PRBS), um codificador RZ com um *duty-cycle* de 25%.

Os sinais do laser e sequência codificada são introduzidos num modulador Mach-Zehnder Diferencial que modulará o sinal pretendido. O bloco seguinte é usado para efeitos de simulação (adiciona um canal lógico de modo a que o receptor possa ter acesso ao sinal original de modo a poder calcular as taxas de erro). Finalmente, é colocado à saída um atenuador embora, para todas as simulações apresentadas, este esteja a atenuar o sinal em 0dB.

- **Duobinário**

Para a emissão do Duobinário foi usada a topologia apresentada na figura 3.2.3.

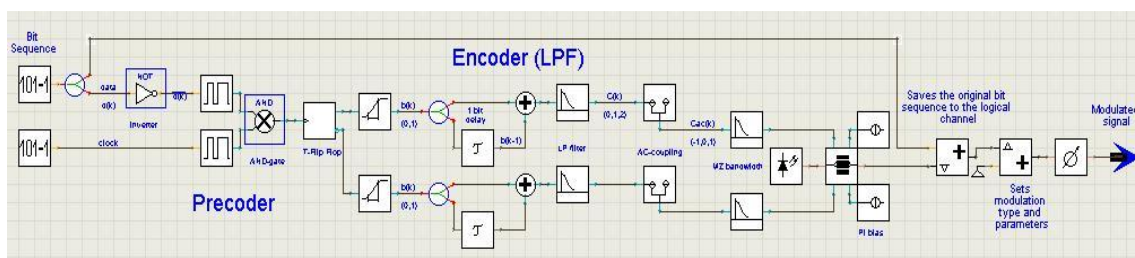


Figura 3.2. 3 - Esquema do emissor Duobinário

Esta topologia consiste em duas sequências pseudo-aleatória codificadas por um codificador NRZ que, de modo a gerar os níveis 0, 1 e 2, uma das sequências é atrasada em relação à outra em um bit. Os níveis ópticos -1, 0 e 1 são gerados fazendo o “drive” do modulador através do ponto nulo da sua função transferência. Os níveis -1 e 1 possuem a mesma intensidade mas fases opostas. Esta estrutura corresponde à estrutura *dual-drive* MZM, apresentada na secção anterior (figura 3.1.1.3b)

- **VSB**

Para a emissão do VSB foi usada a topologia apresentada na figura 3.2.4:

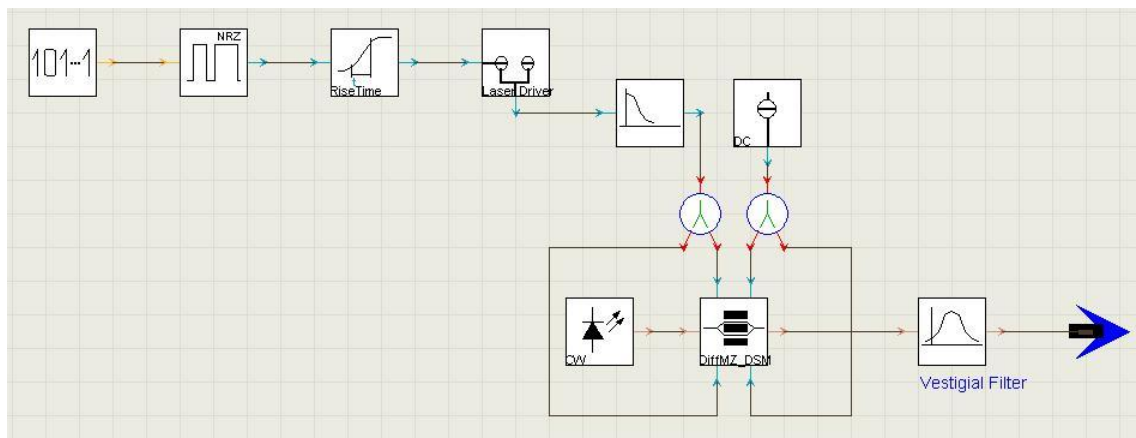


Figura 3.2. 4 - Esquema do emissor VSB

Esta topologia consiste num laser CW (Continuous Wave), uma sequência pseudo-aleatória de bits (PRBS), um codificador RZ com um *duty-cycle* de 25%.

Os sinais do laser e sequência codificada são introduzidos num modulador Mach-Zehnder Diferencial que modulará o sinal pretendido. À saída do modulador é colocado um filtro óptico que fará a filtragem da maior parte da banda indesejável tal como exposto no capítulo 3.1.1. Este filtro tem como principais características uma largura de banda de 200GHz, uma frequência central de 193.2THz (193.1THz+100GHz) sendo este um filtro de ordem 2.5 tal como se pode verificar na figura 3.2.5.

Vestigial Filter		
f	BandwidthVSB	200e9
f	CenterFrequencyVSB	193.1e12+100e9
f	OrderVSB	2.5

Figura 3.2. 5 - Características do filtro óptico VSB

- **Recepção OOK (Detecção directa)**

Para a recepção dos formatos de modulação em intensidade foi usada a mesma estrutura de detecção directa que se encontra esquematizada na figura 3.2.6.

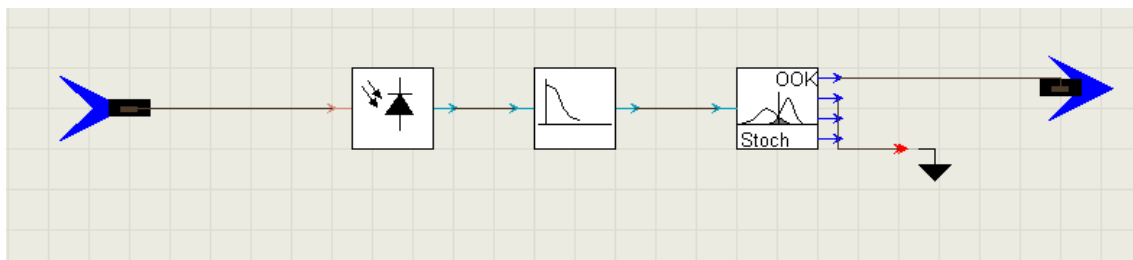


Figura 3.2. 6 - Estrutura do receptor de detecção directa

A estrutura deste receptor é muito simples. Consiste num fotodíodo seguido de um filtro de pós-deteção passa-baixas e um bloco de cálculo de taxas de erros.

- **QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM**

Para a emissão dos formatos QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM foi usado o mesmo esquema com leves variações de modo a gerar os diferentes formatos de modulação. Este esquema encontra-se na figura 3.2.7 abaixo.

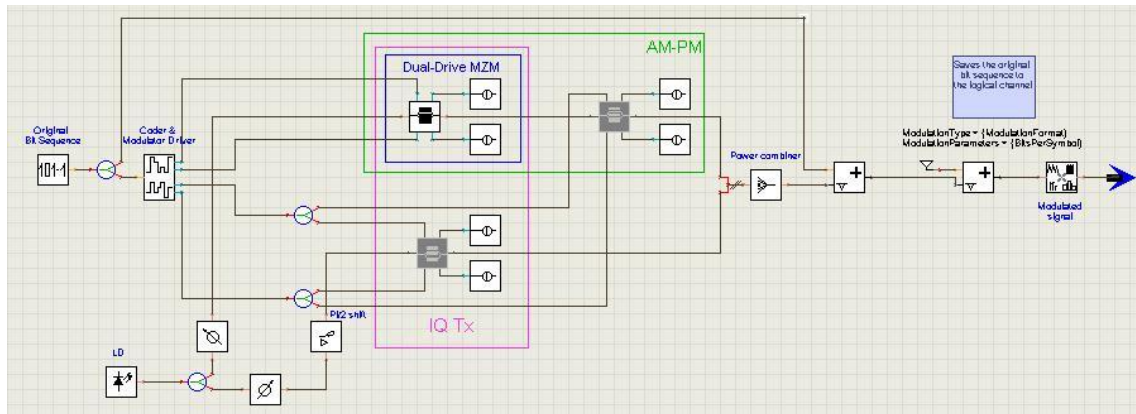


Figura 3.2. 7 - Esquema genérico do emissor para o QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM

Esta configuração consiste num laser CW que, conjuntamente com numa sequência pseudo-aleatória (PRBS) seguido por num codificador e driver (que codificará o sinal consoante a modulação requerida), irão entrar em dois moduladores Mach-Zehnder diferenciais (responsáveis pela construção das constelações para os sinais M-QAM).

Estes são por sua vez seguidos de um outro modulador Mach-Zehnder diferencial que fará modulação em fase para o QPSK e DQPSK ou fará uma modulação em amplitude e fase para os sinais M-QAM (no caso deste trabalho, 16-QAM e 64-QAM).

Finalmente, os sinais dos dois moduladores são combinados através do combinador óptico de potência (“*power combiner*”) e, juntamente com a sequência original de bits serão adicionados ao canal lógico (para no receptor ser possível estimar a taxa de erros) e o sinal modulado é enviado para o exterior.

- **Recepção em fase ou em amplitude e fase (Detecção coerente)**

De igual modo, a estrutura do receptor para os formatos QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM é idêntica para todos eles. Esta encontra-se exposta na figura 3.2.8.

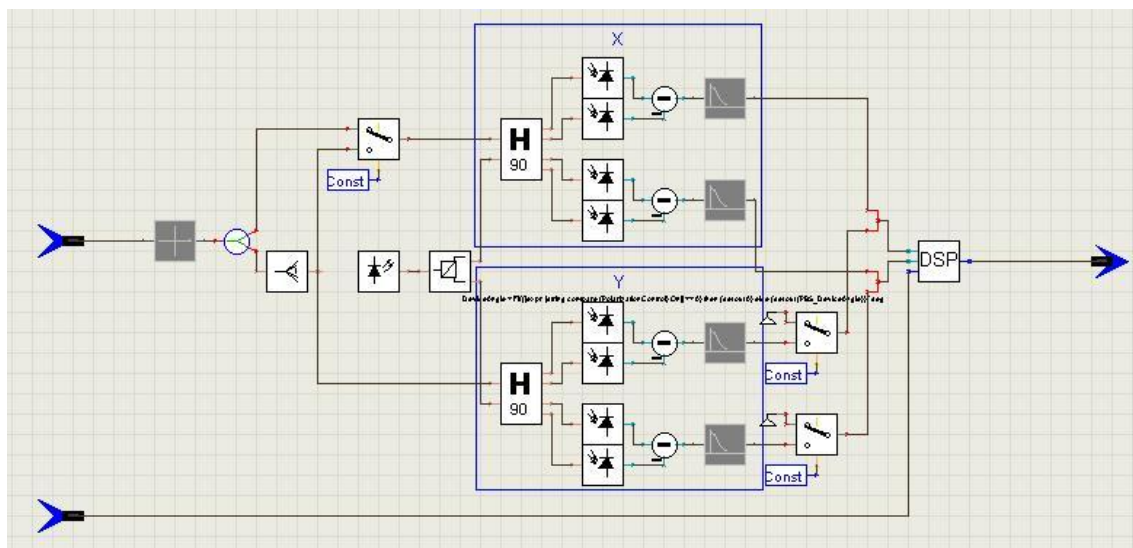


Figura 3.2. 8 - Esquema genérico para o receptor do QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM

O receptor é essencialmente constituído por um controlador de polarização seguido de dois detectores ópticos híbridos 2x4 em quadratura. Estes detectores combinam o sinal de um oscilador local (sinal de referência gerado pelo laser CW presente na figura) e o sinal de entrada, gerando quatro sinais de saída com uma diferença de fase de 90° entre eles.

Estes sinais são filtrados e servem como entrada a um processador digital de sinal que, para o efeito das simulações efectuadas apenas efectua a estimação da taxa de erros.

Capítulo 4 – Apresentação de resultados

De modo a comparar os diferentes formatos de modulação, estes serão simulados no VPISystemsTM usando sempre uma abordagem sistemática. Assim, para todos os esquemas de simulação usados existem vários parâmetros em comum. São estes a frequência central de transmissão (103.1THz), sequência de 1024 bits de dados de teste pseudo-aleatória PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*), sendo a probabilidade dos bits “0” e “1” iguais a 50%, potência do laser de 1mW, transmissão com apenas um canal e um comprimento de onda $\lambda=1550\text{nm}$. No caso da detecção directa, o ruído térmico dos fotodetectores usados (PIN) é de $1.8 \times 10^{-11} \text{A/Hz}^{-1/2}$, sendo usado como filtro de pós-deteção, um filtro de Bessel de quarta ordem com uma largura de banda de 75% do ritmo de transmissão. O método usado para a estimação do Bit Error Rate (BER) é o método de Gauss-ISI.

As fibras usadas nas simulações possuem também sempre as mesmas características. Destas características podem-se destacar os parâmetros de dispersão ($D=16.7\text{ps/nm.km}$), atenuação (0dB/km) e PMD ($2 \times 10^{-12}/31.62 \text{ s/m}^{-1/2}$).

A atenuação das fibras foi colocada a um valor nulo de modo a que seja possível analisar os sistemas com variados níveis de atenuação (para um mesmo valor de dispersão), usando para tal, um bloco denominado “*Sweep Attenuator*”, que conferirá ao sinal vários valores de atenuação.

Na figura 4.1 apresentam-se as características da fibra usadas nas simulações.

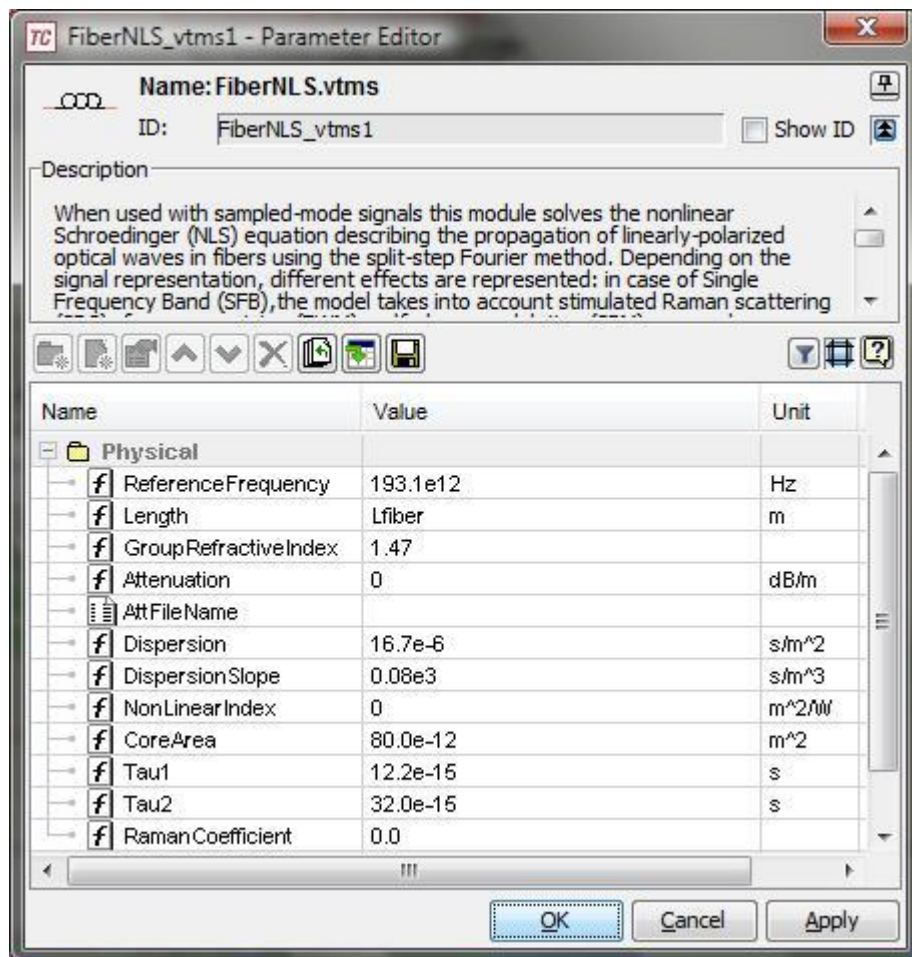


Figura 4. 1 - Quadro dos parâmetros para uma fibra óptica genérica usada nas simulações

De modo a verificar o impacto da dispersão e atenuação nos sistemas foram realizadas varias simulações, a vários ritmos de transmissão (2.5, 10, 20 e 40Gbps), usando o seguinte esquema:

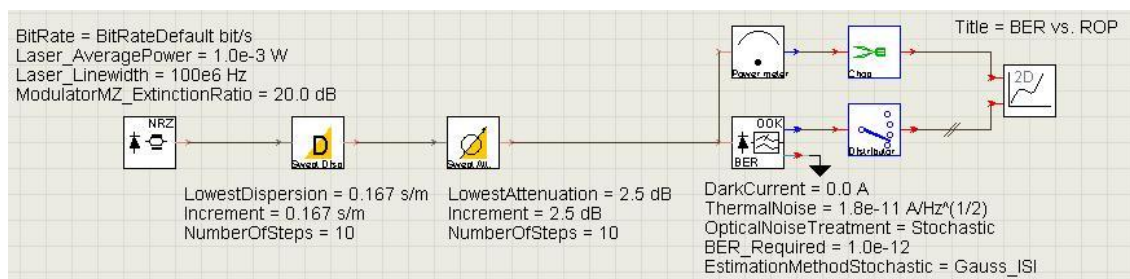


Figura 4. 2 - Esquema de simulação do VPISystemsTM para o formato de modulação NRZ-OOK

Note-se que o esquema apresentado é para o formato NRZ-OOK. No entanto, para outros formatos o esquema base é o mesmo, apenas se alteram o transmissor e receptor.

Através deste esquema obtiveram-se gráficos de BER vs. ROP (Bit Error Rate vs. Received Optical Power) para vários valores de dispersão acumulada, dos quais se apresenta um (usando o formato NRZ-OOK a 10Gbps), a título exemplificativo, na figura 4.3.

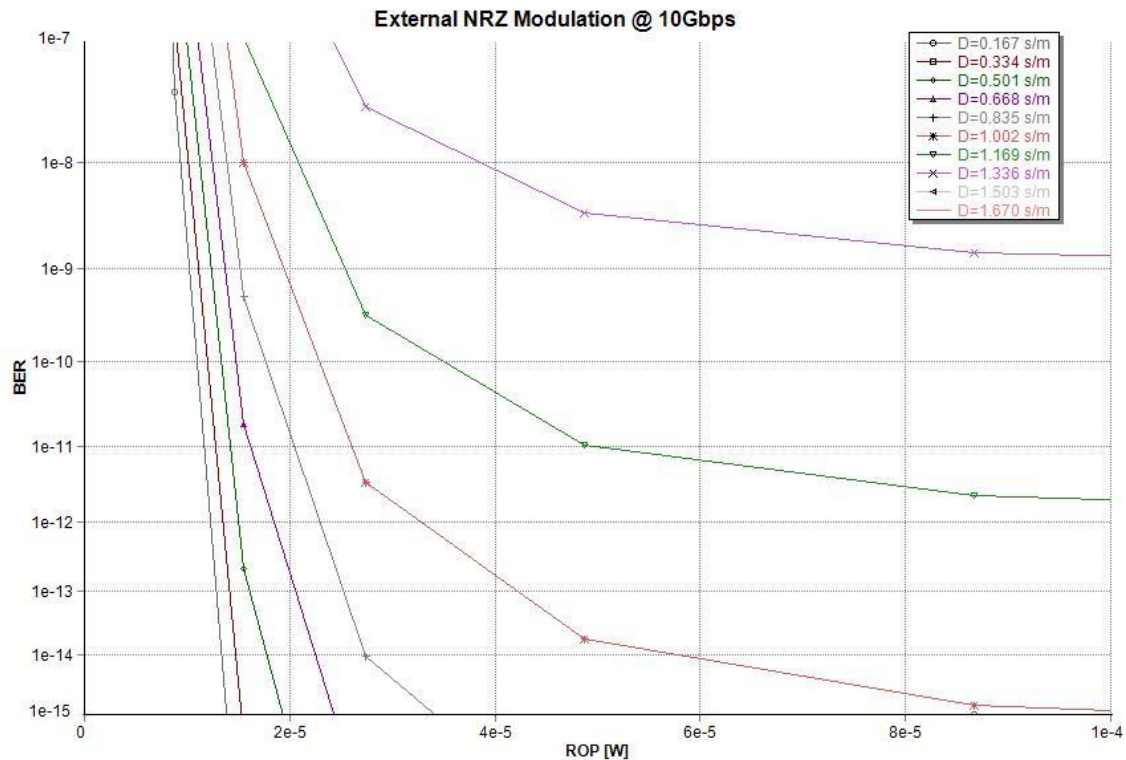
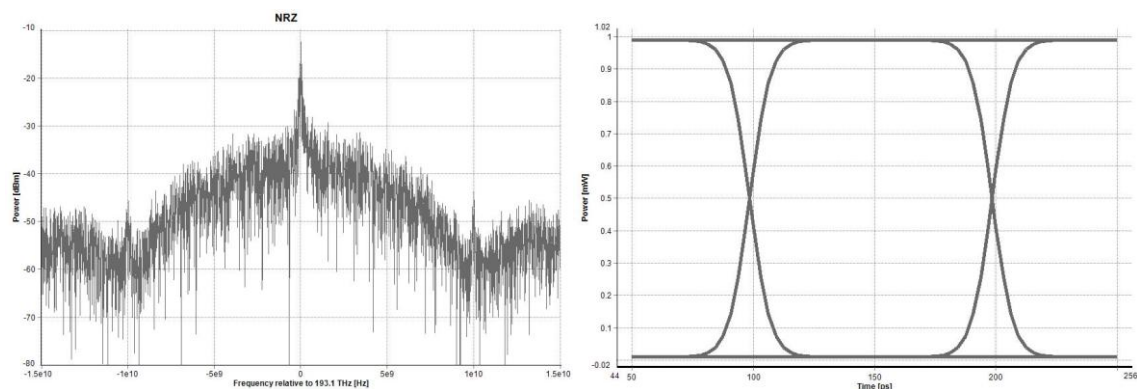


Figura 4. 3 - BER vs. ROP para vários valores de dispersão acumulada para o formato NRZ-OOK a 10Gbps

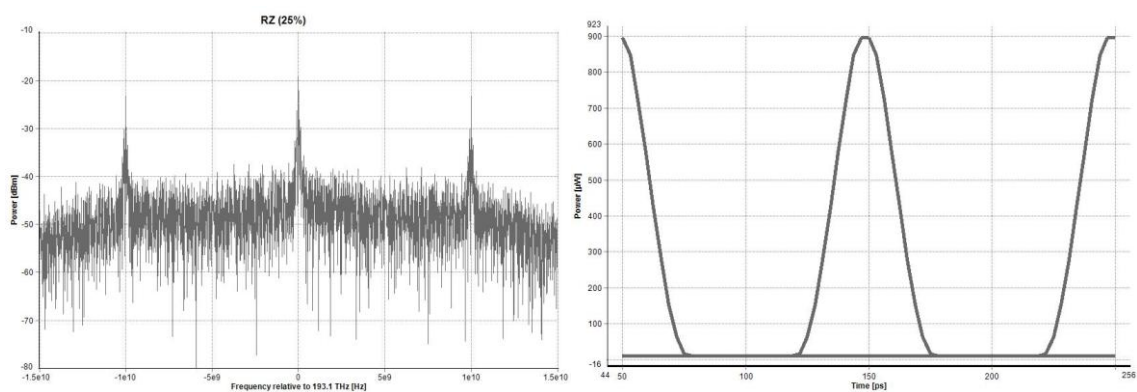
Neste gráfico observa-se o efeito da dispersão acumulada nos sistemas, verificando-se naturalmente a degradação da taxa de erros (BER) com o aumento da dispersão bem como, para cada valor de dispersão acumulada, com o aumento da atenuação, ou seja diminuição da ROP.

4.1 – Caracterização Espectral

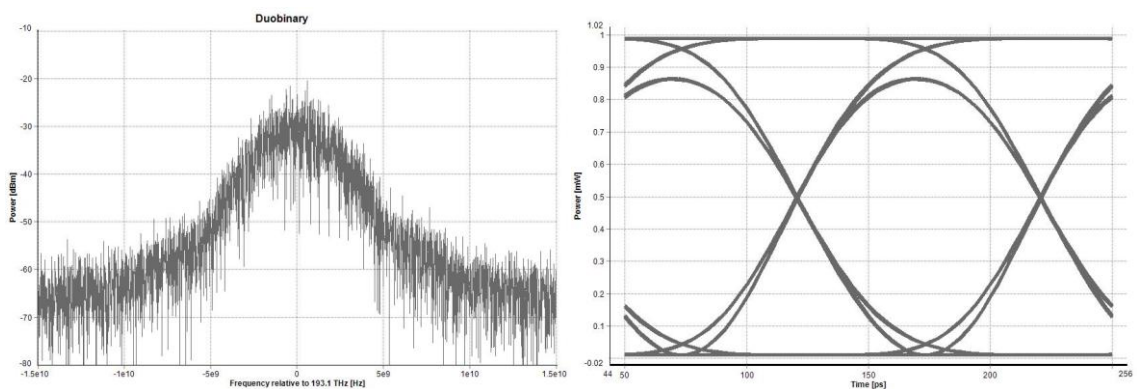
De modo a caracterizar espectralmente cada um dos formatos de modulação, foram obtidos os espectros ópticos e diagramas de olho ou constelações à saída do transmissor. Os resultados obtidos encontram-se nas figuras 4.1.1(a) a 4.1.1 (h) abaixo para um ritmo de transmissão de 10Gbps.



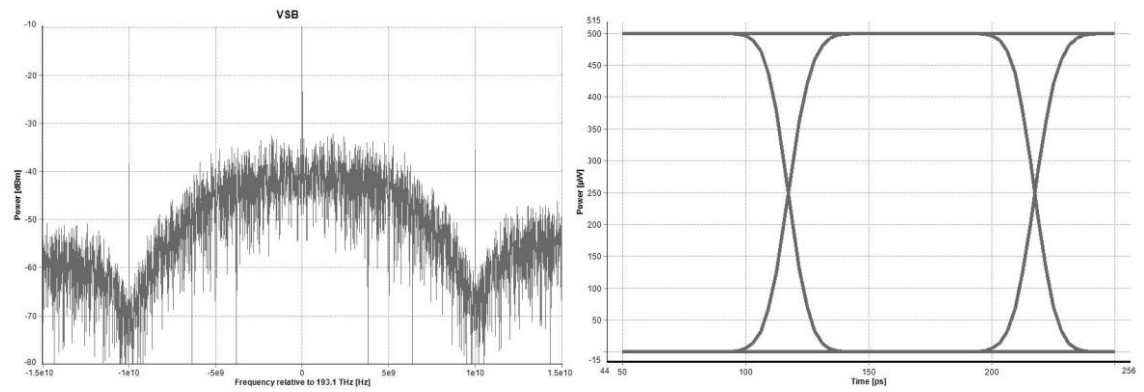
(a)



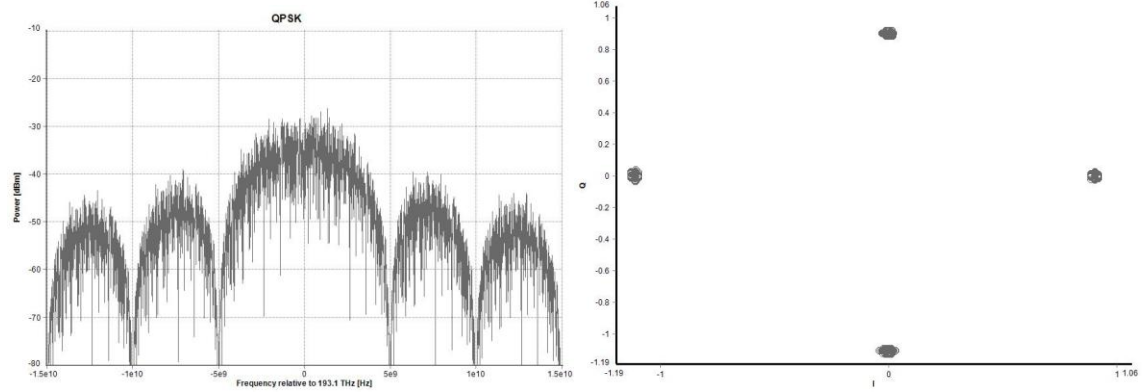
(b)



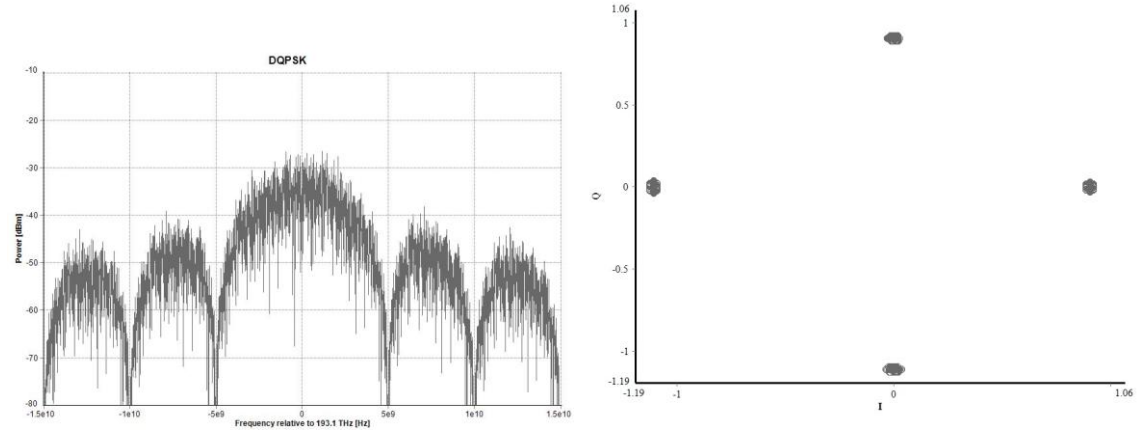
(c)



(d)



(e)



(f)

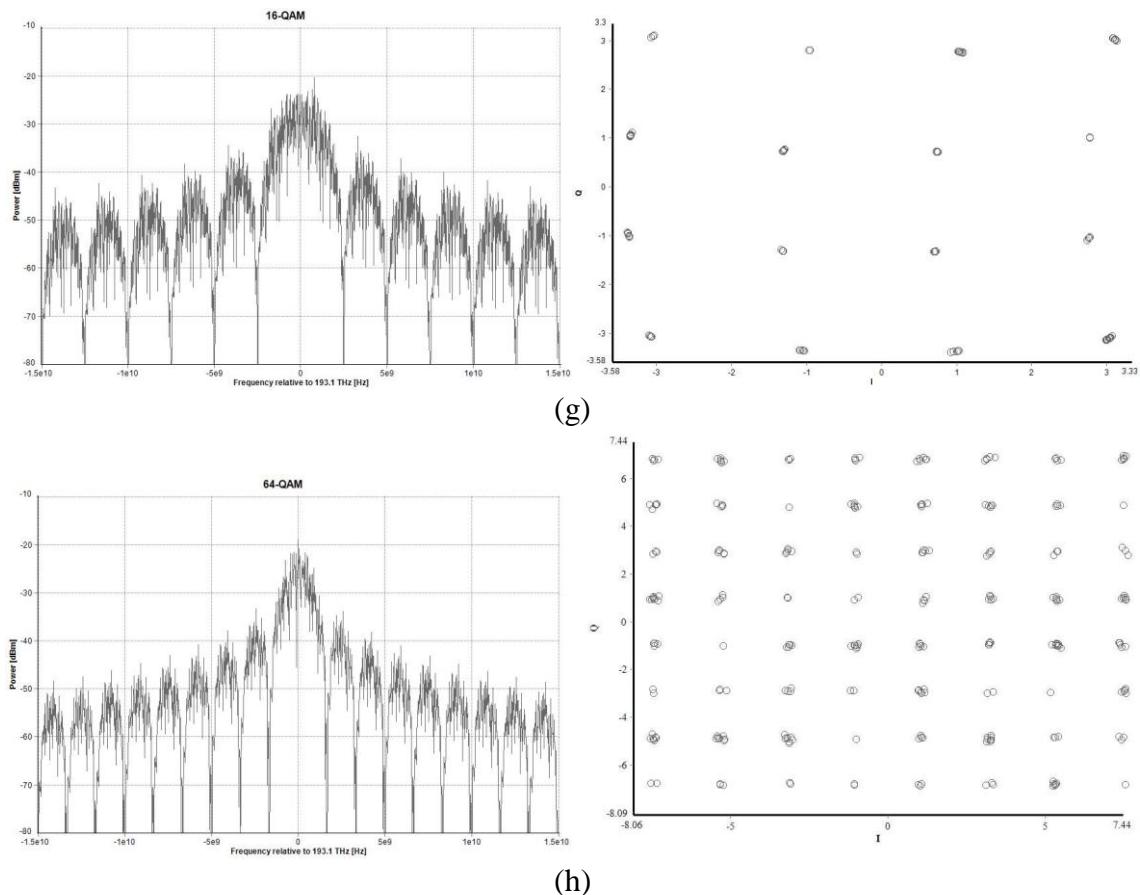


Figura 4.1. 1 - Espectros ópticos e respectivos diagramas de olho ou constelações dos formatos (a)NRZ-OOK (b) RZ-OOK (c) Duobinário (d) NRZ-VSB (e) QPSK (f) DQPSK (g) 16-QAM (h) 64-QAM

Pela observação dos espectros ópticos destes formatos desde já se pode prever que o formato RZ-OOK (25%) será o menos resistente ao efeito da dispersão pois é este que apresenta o espectro mais largo. Pelo contrário, os formatos em fase e amplitude como o 16-QAM e 64-QAM deverão ser os mais resistentes à dispersão pois os espectros destes são mais estreitos.

Considerando agora apenas os formatos de modulação em intensidade, e tomando como referência o formato NRZ, é espectável que seja o VSB o formato com melhor desempenho pois é este que demonstra ter uma menor ocupância espectral. No entanto também é previsível um melhor desempenho do Duobinário face ao NRZ pois o espectro óptico deste é mais estreito. Assim, apenas o RZ deverá apresentar um pior desempenho, quando comparado ao NRZ, devido à maior ocupância espectral deste formato.

Observando os espectros dos formatos de modulação em fase (QPSK e DQPSK) bem como os formatos de amplitude e fase (16-QAM e 64-QAM), e tendo em consideração a

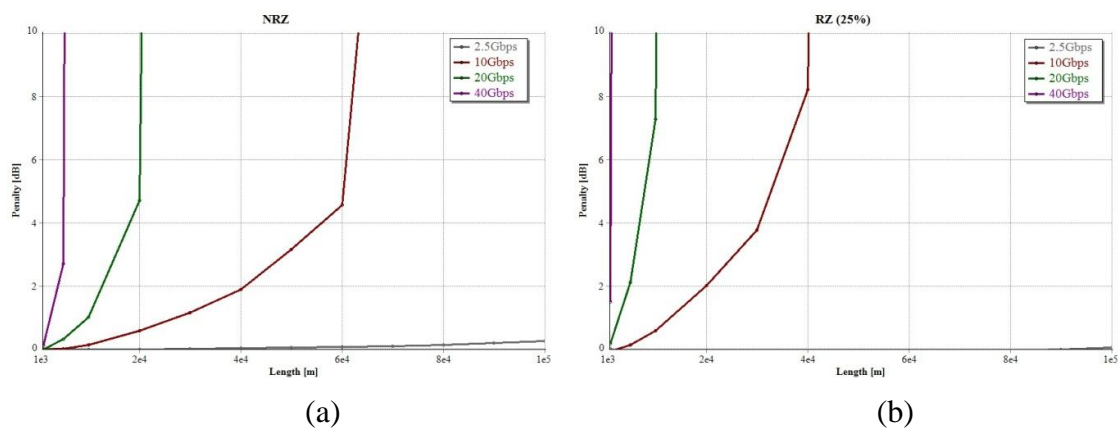
ocupância espectral dos seus respectivos espectros ópticos, verifica-se que os que tendencialmente apresentarão melhor comportamento serão os últimos (16-QAM e 64-QAM). Não obstante, o 64-QAM deverá ser superior devido às suas superiores características espectrais. No que diz respeito aos formatos em fase, o QPSK e DQPSK apresentam espectros semelhantes, e como tal deverão apresentar comportamentos idênticos.

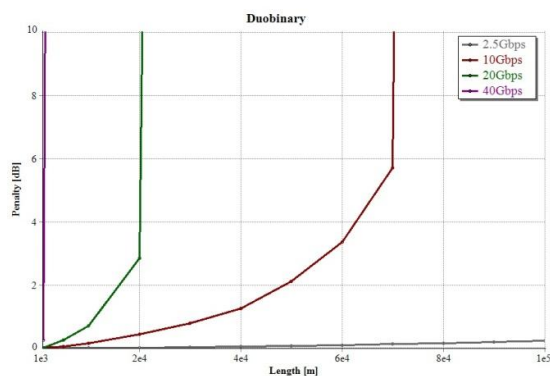
De modo a melhor caracterizar estes formatos, foram realizados estudos suplementares que serão apresentados e discutidos nas secções seguintes.

4.2 – Penalidade de potência

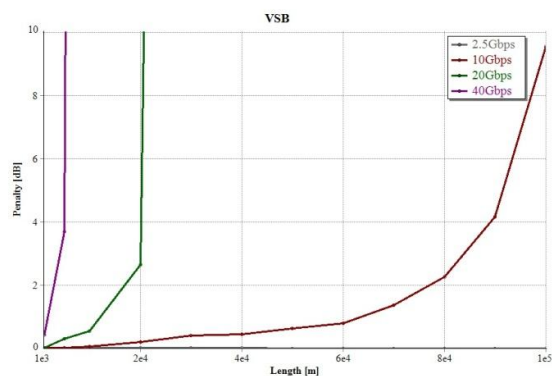
A penalidade de potência é um dos parâmetros mais importantes para aferir das potencialidades de um formato de modulação no que diz respeito à sua capacidade de resistir aos efeitos de degradação do sinal ao longo da fibra óptica. A penalidade de potência foi medida comparando uma situação de “*back-to-back*” (transmissor e emissor ligados sem fibra óptica entre estes), e uma situação com fibra óptica para uma taxa de erros fixa e igual a 1×10^{-12} .

Usando o método descrito obtiveram-se os resultados expostos figura 4.2.1.

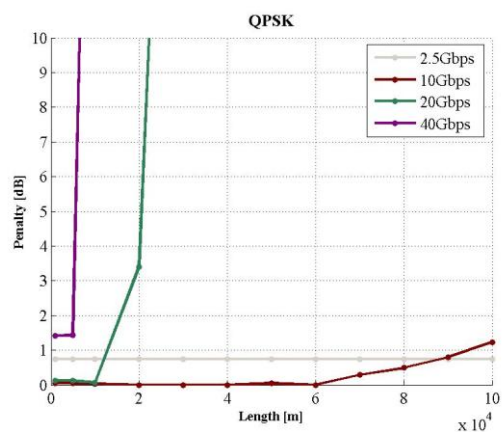




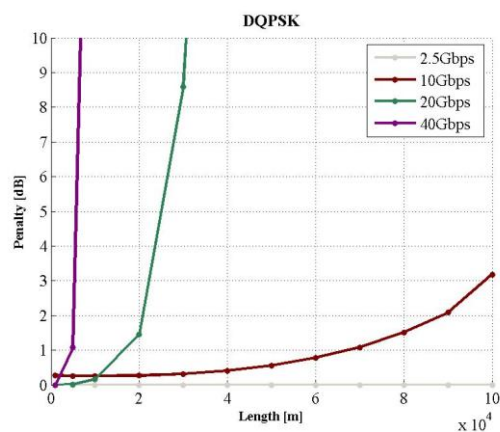
(c)



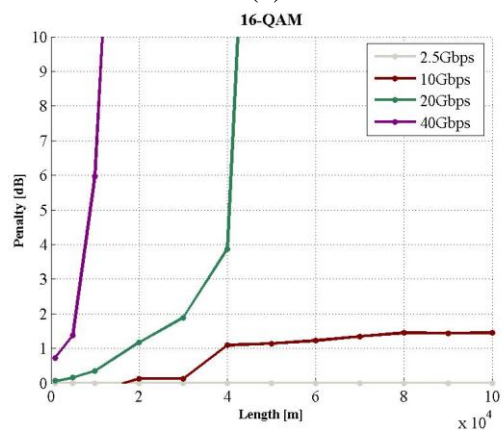
(d)



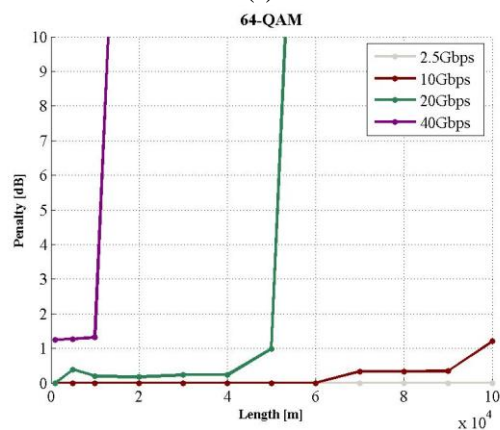
(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 4.2. 1 - Penalidade de potência vs. Distância de fibra para os formatos (a)NRZ-OOK (b) RZ-OOK (c) Duobinário (d) NRZ-VSB (e) QPSK (f) DQPSK (g) 16-QAM (h) 64-QAM

Considerando apenas os formatos de modulação em intensidade constata-se que, tal como esperado, é o formato RZ que apresenta um pior comportamento. Para ritmos de

transmissão baixos (2.5Gbps) este formato apresenta uma penalidade de potência de aproximadamente 0.05dB que é inferior à penalidade do NRZ e Duobinário (0.25dB) e apenas comparável à penalidade do VSB que é desprezável. Contudo, para ritmos de transmissão elevados (≥ 10 Gbps) rapidamente a penalidade do RZ cresce, verificando-se que, a 10Gbps, para distâncias superiores a 40km a recuperação do sinal torna-se inviável sem regeneração, verificando o mesmo para distâncias acima dos 10Km para 20Gbps.

Os melhores resultados pertencem ao VSB. Este formato apresenta uma maior resistência aos efeitos da dispersão mesmo para ritmos de transmissão mais elevados. Isto deve-se ao espectro óptico associado ser o mais estreito e portanto apresentar uma menor ocupância espectral que lhe permite apresentar um melhor comportamento face à dispersão. Note-se que este formato permite transmissões a 10Gbps até 100km (limite máximo de distância considerado para este estudo) o que não acontece com nenhum outro formato.

É de referir ainda que o Duobinário demonstra um desempenho superior ao NRZ apresentando penalidades inferiores às deste último para todos os ritmos de transmissão.

Destes dados observa-se a relação proporcional entre a eficiência espectral de um formato de modulação e o seu desempenho num sistema óptico, como se esperava da análise efectuada no capítulo 2.

Considerando agora os formatos modulação em fase estudados, verifica-se que estes possuem um melhor comportamento comparativamente aos formatos de intensidade. Mesmo o VSB, a 10Gbps, para distâncias elevadas (> 80 km) apresenta uma penalidade de aproximadamente 2.3dB enquanto os formatos QPSK e DQPSK apresentam uma penalidade de aproximadamente 0.5dB e 1.5dB respectivamente.

Observando o ritmo de 20Gbps, os formatos de fase estudados (QPSK e DQPSK) demonstram um comportamento distinto. Isto é, o QPSK apresenta penalidades semelhantes ou até inferior aos formatos de intensidade como o Duobinário e VSB (para 20km o QPSK tem uma penalidade de 3,4dB e o Duobinário e VSB exibem uma penalidade de aproximadamente 2,9dB e 2,6dB respectivamente) mas o DQPSK demonstra, para 20km, uma penalidade de aproximadamente 1.4dB conseguindo ainda manter a transmissão até aos 30km, valor que não é atingido por nenhum dos formatos de intensidade ou pelo QPSK. Isto prende-se com o facto de o DPSK, por ser um formato diferencial, resistir melhor ao ruído comparativamente ao QPSK e ter uma eficiência espectral superior face aos formatos de modulação em intensidade.

Os formatos em amplitude e fase (QAMs), para ritmos de transmissão até 10Gbps, apresentam uma penalidade de potência reduzida tal como os formatos de modulação em fase, no entanto, é para ritmos de transmissão superiores que estes formatos se destacam.

A 20Gbps a penalidade de potência para estes formatos é sempre inferior a 2dB para distâncias até aos 40Km. Verifica-se ainda que destes dois formatos, é o 64-QAM que, para ritmos superiores (20 e 40Gbps) apresenta o melhor desempenho devido às penalidades de potência inferiores que oferece.

Isto sugere que um maior número de bits por cada símbolo codificado para estes formatos melhora o comportamento do formato pois este é mais estreito comparativamente ao 16-QAM.

Este facto juntamente com os resultados dos espectros ópticos (note-se que o espectro óptico do 64-QAM é mais estreito do que o espectro do 16-QAM), sugerem que, um maior número de bits por símbolo, implicará um melhor desempenho do formato num sistema óptico.

Para 40Gbps verifica-se claramente a incapacidade de qualquer um destes formatos, transmitir a grandes distâncias sem qualquer tipo de regeneração do sinal. Consequentemente não é possível fazer uma comparação clara entre os formatos. Para este efeito, foi realizado um estudo de penalidade de potência para os formatos em fase e de amplitude e fase estudados, em tudo semelhante ao anterior. No entanto, as distâncias de fibra óptica consideradas são inferiores (entre 0.5 e 10km) permitindo uma análise mais detalhada na gama de distâncias às quais estes formatos permitem transmitir sem regeneração de sinal. Os resultados obtidos estão representados na figura 4.2.2.

Neste estudo pode-se observar o comportamento dos formatos que, nos estudos anteriores, melhor comportamento apresentaram.

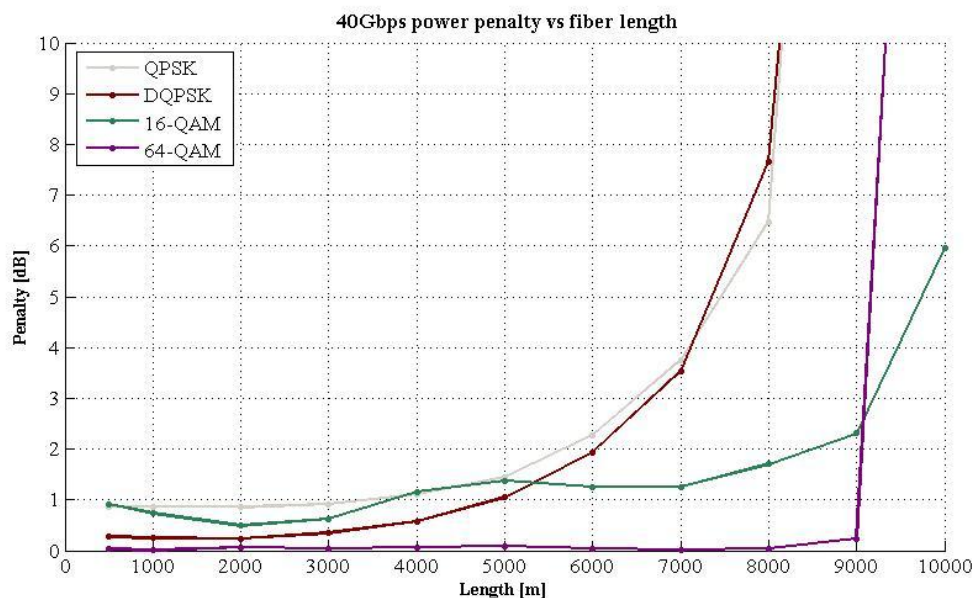


Figura 4.2. 2 - Penalidade de potência vs comprimento da fibra

Constata-se que o QPSK e DQPSK demonstram ter um comportamento semelhante, no qual a penalidade de potência sofre incrementos progressivos até aos 8Km a partir dos quais a transmissão sem qualquer tipo de regeneração se torna inviável.

Para os formatos 16-QAM e 64-QAM, as penalidades registadas ao longo da fibra são tipicamente mais baixas (até aos 9km as penalidades são sempre inferiores a 2.5dB). No entanto, aos 10Km a transmissão pelo 64-QAM torna-se impossível, o que não se verifica para o 16-QAM, que a esta distância apresenta uma penalidade de 6dB.

Este resultado contraria todas as indicações dos estudos anteriores. Note-se que o espectro óptico do 64-QAM é o mais estreito e a penalidade de potência para todos os ritmos de transmissão anteriormente estudados é a mais baixa.

De modo a explicar esta parente contradição é necessário ter em consideração que a penalidade de potência representa apenas a diferença de potência entre uma situação “back-to-back” e uma situação idêntica com um determinado comprimento de fibra óptica. Estes dados não dão a ideia dos valores absolutos de potência óptica envolvidos. De modo a esclarecer esta situação e a melhor quantificar os resultados da penalidade de potência apresenta-se a seguinte tabela com as potências ópticas absolutas para todos os formatos de modulação bem como os resultados da dispersão acumulada para uma penalidade de 2dB.

Formato de Modulação	Ritmo de transmissão [Gbps]	“Back-to-Back” ROP [dBm] (BER=1×10 ⁻¹²)	CD acumulada [ps/nm] (2dB penalty)
NRZ	2.5	-22.53	-
	10	-19.51	681.36
	20	-17.99	212.09
	40	-16.47	65.46
RZ	2.5	-24.84	-
	10	-21.82	332.33
	20	-20.31	79.49
	40	-18.79	32.06
DB	2.5	-21.42	-
	10	-18.42	811.62
	20	-16.42	267.20
	40	-12.75	17.70
VSB	2.5	-22.78	-
	10	-19.75	1289.24
	20	-18.22	283.90
	40	-16.46	48.76
QPSK	2.5	-41.40	-
	10	-35.54	-
	20	-32.73	290.58
	40	-29.70	95.51
DQPSK	2.5	-38.86	-
	10	-32.86	1485.63
	20	-29.64	357.38
	40	-26.65	101.10
16-QAM	2.5	-32.13	-
	10	-26.40	-
	20	-23.55	519.37
	40	-21.18	143.54
64-QAM	2.5	-18.45	-
	10	-13.67	-
	20	-10.43	849.03
	40	-8.58	153.59

Tabela 1 - Valores de ROP para back-to-back e CD acumulada para uma penalidade de 2dB

Através da análise dos resultados obtidos anteriormente, verifica-se que quanto maior a complexidade do formato de modulação, tendencialmente o seu desempenho é melhor. Com estes resultados observa-se que à medida que a complexidade do formato aumenta, a potência óptica exigida para uma determinada taxa de erros também aumenta. Analisando mais concretamente as potências ópticas em “back-to-back” do 64-QAM, verifica-se que existe uma grande discrepância entre as potências ópticas deste formato em relação aos demais formatos. Para 40Gbps, a potência óptica em “back-to-back” é de -8.6dBm, o que, comparativamente aos outros formatos de modulação está 136% acima da média das potências para esta situação.

Assim, conclui-se que o súbito aumento da penalidade do 64-QAM está relacionado com a potência óptica exigida pelo formato.

Logo, neste caso a penalidade deverá ser resolvida através de uma pré-amplificação do sinal, não sendo necessária uma regeneração do mesmo.

Tendo como suporte a tabela acima exposta, verifica-se que para uma penalidade de 2dB e para um ritmo de transmissão de 10Gbps apenas os formatos de fase e amplitude e fase permitem transmissões até aos 100Km com uma penalidade inferior a 2dB (considerando apenas os formatos em intensidade o melhor é o VSB que, para esta penalidade, suporta uma dispersão acumulada de aproximadamente 1290ps/nm)

Para ritmos mais exigentes destacam-se claramente os formatos de amplitude e fase que, a 20Gbps, suportam dispersões acumuladas de 520ps/nm e 849ps/nm para o 16-QAM e 64-QAM respectivamente. Estes são os únicos formatos que suportam dispersões superiores a 500ps/nm com uma penalidade inferior a 2dB. Sublinhe-se ainda que para 20Gbps apenas o DQPSK suporta dispersões superiores a 300ps/nm (357ps/nm), o que confirma as conclusões retiradas através da análise dos gráficos da penalidade de potência.

A 40Gbps as conclusões sobre o comportamento dos formatos são idênticas. Isto é, o 64-QAM é o formato que suporta uma maior dispersão (154ps/nm) seguindo do 16-QAM (144ps/nm) e, excluindo estes formatos é o DQPSK o único que suporta uma dispersão superior a 100ps/nm (101ps/nm) embora o QPSK suporte 96ps/nm.

Assim, conclui-se que para ritmos de transmissão elevados (20Gbps e 40Gbps) são os formatos 16-QAM e 64-QAM que apresentam os melhores resultados.

4.3 – WDM

O *Wavelength Division Multiplexing* é uma técnica abundantemente usada nos sistemas de comunicações ópticas actuais. Esta técnica permite o uso da mesma fibra para transmitir ao mesmo tempo várias portadoras ópticas (canais) usando, para o efeito, um comprimento de onda distinto para cada canal, permitindo um uso mais eficiente da largura de banda das fibras ópticas.

No lado da transmissão, os dados de n utilizadores são modulados em n portadoras ópticas de alta frequência, cada uma com um comprimento de onda (λ) diferente que podem ser espaçados baseados nos padrões do ITU-T.

Um multiplexador de comprimento de onda combina os n sinais ópticos para apenas numa fibra.

No lado da recepção, um demultiplexador separa os n sinais ópticos em canais apropriados, usando para o efeito, n filtros ópticos onde a sua frequência central de cada filtro se baseia na frequência da portadora óptica emitida.

A capacidade total de um sistema WDM depende de como os canais são espaçados na janela de transmissão disponível. A maior desvantagem do WDM prende-se com a baixa taxa de utilização de cada canal e eficiência espectral pois para cada utilizador é necessário um comprimento de onda distinto. Assim, n utilizadores necessitam de n comprimentos de onda e n filtros, o que aumenta o custo do sistema. É o objectivo de outras técnicas de multiplexagem e de modulação aumentar a utilização de cada canal e/ou a capacidade por canal dos sistemas WDM.

Assim, foram feitas uma série de simulações de modo a observar o comportamento dos formatos de modulação abordados neste trabalho face ao espaçamento entre cada canal.

As simulações basearam-se num esquema WDM de 8 canais que irá permitir um estudo comparativo entre os vários formatos de modulação. A frequência de cada canal é determinada pelo espaçamento entre canais simulado sempre em torno de uma frequência central de 193.1THz ($\sim 1550\text{nm}$). A demultiplexação do sinal é feita usando um filtro de Bessel passa-banda de terceira ordem com uma largura de banda de 40 GHz, cuja resposta se encontra ilustrada na figura 4.3.1 (esta resposta foi obtida para uma frequência central do filtro de 193.1 THz).

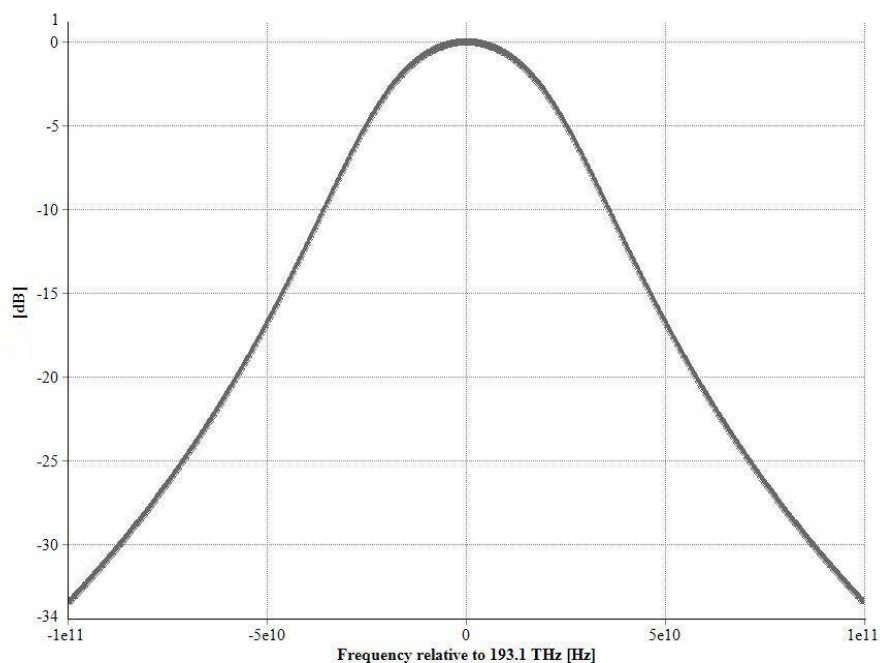


Figura 4.3. 1 - Resposta do filtro usado para a demultiplexagem WDM

Os restantes parâmetros do sistema mantiveram-se inalterados aos usados nas simulações anteriores, nomeadamente a potência de saída dos lasers, *extinction ratio* dos moduladores, parâmetro de dispersão e PMD da fibra bem como o ruído do detector usado nos casos de detecção directa (1 mW, 20 dB, $16.7 \text{ ps.nm}^{-1}.\text{km}^{-1}$, $2 \times 10^{-12}/31.62 \text{ s/m}^{-1/2}$ e $1.8 \times 10^{-11} \text{ A/Hz}^{-1/2}$ respectivamente).

Estas simulações foram realizadas a um ritmo de transmissão fixo e igual a 10Gbps para um comprimento da fibra de 40 km.

A figura 4.3.2 exemplifica o esquema usado (na figura o formato apresentado é o NRZ) e a figura 4.3.3 mostra dois espectros ópticos ilustrativos da separação entre canais (para o mesmo formato de modulação).

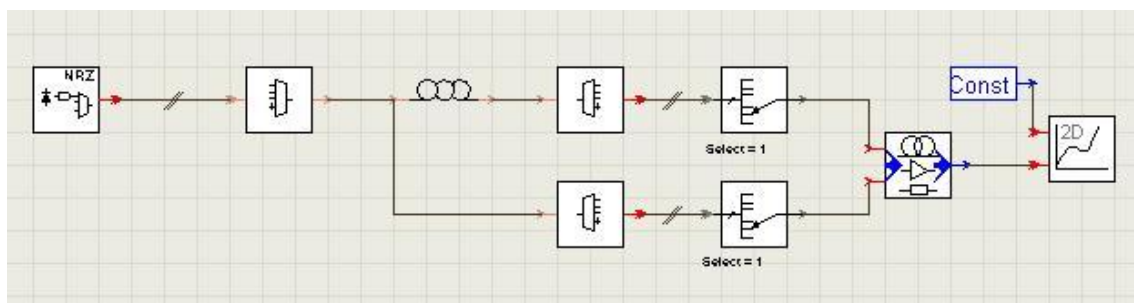


Figura 4.3. 2- Esquema de simulação do VPISystemsTM para o formato de modulação NRZ-OOK em WDM

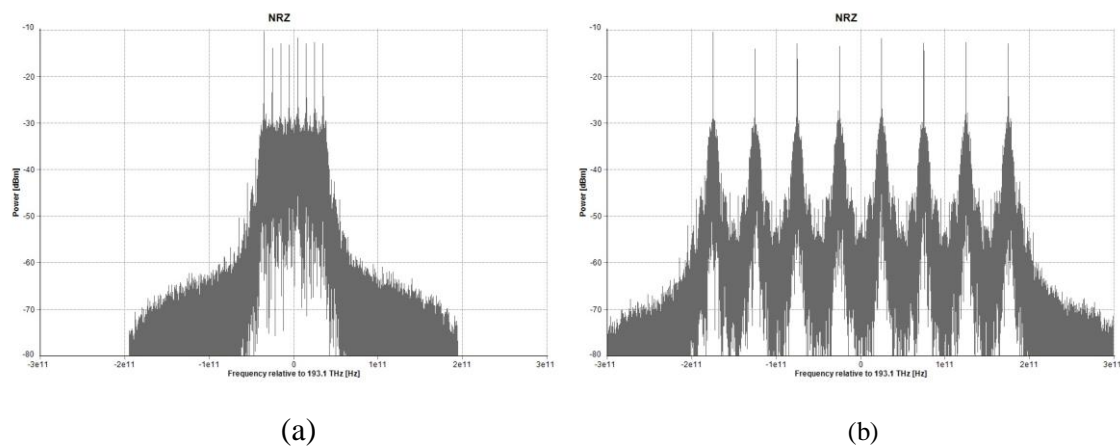


Figura 4.3. 3- Espectros ópticos à saída do transmissor para o formato NRZ-OOK para diferentes valores de espaçamento entre canais (a) 10GHz (b) 50GHz

Através destas simulações foi possível obter a penalidade de potência face ao espaçamento entre os canais para os diversos formatos estudados. Estes resultados estão sintetizados nas figuras 4.3.4 e 4.3.5 abaixo apresentadas.

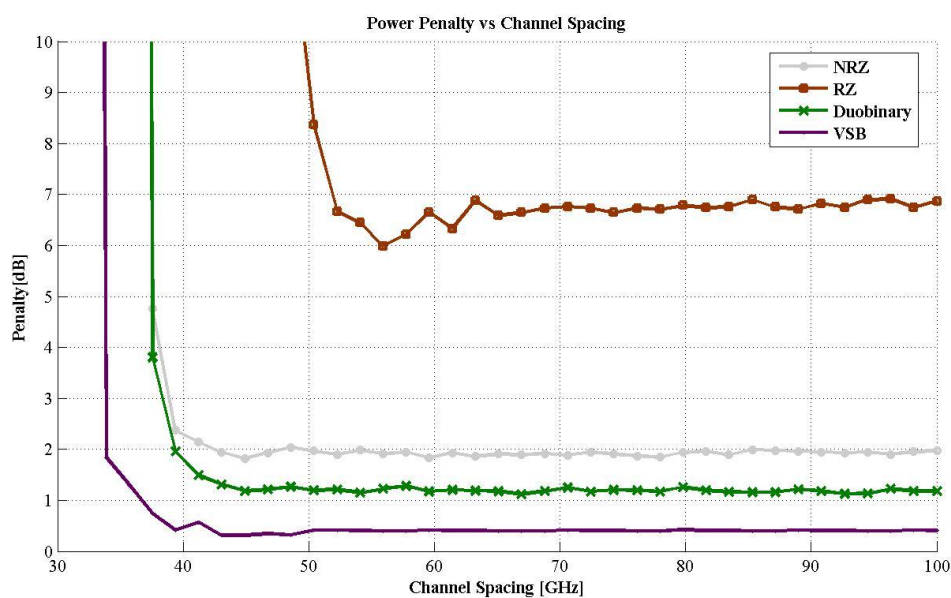


Figura 4.3. 4 - Penalidade de potência vs espaçamento entre canais para os formatos NRZ, RZ, Duobinário e VSB

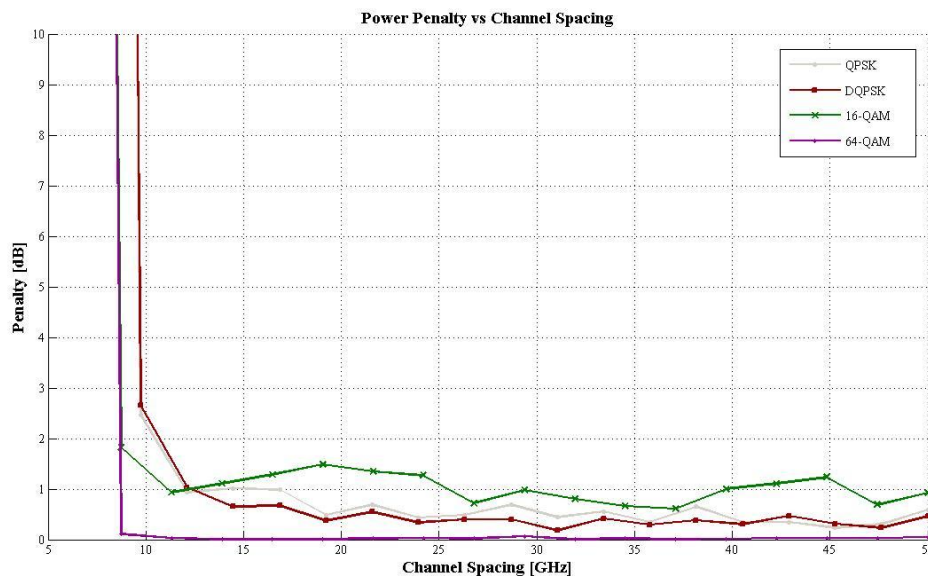


Figura 4.3. 5 - Penalidade de potência vs espaçamento entre canais para os formatos QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM

Analisando os resultados obtidos na figura 4.3.3, verifica-se que para espaçamentos entre canais abaixo dos 35GHz aproximadamente, nenhum dos formatos de modulação em intensidade apresenta uma penalidade inferior a 10dB. A partir deste valor, apenas os formatos com menor ocupância espectral demonstram penalidades inferiores a 5dB, razão pela qual, o formato RZ nunca apresenta uma penalidade inferior a 6dB mesmo para espaçamentos superiores ($\geq 50\text{GHz}$), onde os restantes formatos em intensidade apresentam uma penalidade muito mais baixa, comparativamente ao RZ (aproximadamente 2dB, 1.2dB e 0.5 dB para respectivamente NRZ, Duobinário e VSB).

Considerando os formatos de modulação em fase e amplitude e fase (figura 4.3.4), verifica-se que estes permitem a transmissão, para espaçamentos entre canais substancialmente mais reduzidos em comparação com os formatos em intensidade (aproximadamente 10GHz face aos 35GHz dos formatos em intensidade), nunca excedendo uma penalidade de 3dB a partir dos 10GHz no caso dos formatos de fase e 2dB a partir dos 9GHz no caso dos formatos de amplitude e fase.

Observa-se ainda que as penalidades para espaçamentos superiores a 15GHz são reduzidas, podendo-se destacar entre estes formatos, o 64-QAM que demonstra uma penalidade aproximadamente nula ($\sim 0.1\text{dB}$), enquanto os restantes formatos apresentam como valores típicos 1.5dB, 0.7dB e 0.5dB de penalidade (16-QAM, QPSK e DQPSK respectivamente).

Considerando estes resultados, verifica-se a preponderância da eficiência espectral no desempenho dos formatos de modulação em sistemas WDM, nomeadamente face ao espaçamento entre canais que permitem. Sublinha-se o especial relevo a diferença verificada entre o espaçamento entre canais permitido pelos formatos de modulação em intensidade por comparação aos formatos de fase ou amplitude e fase. A menor ocupância espectral destes últimos torna-se uma clara mais-valia em sistemas WDM.

Capítulo 5 – Considerações finais

5.1 – Conclusões

Com base nos resultados obtidos observa-se que, de facto, o formato de modulação usado num sistema de comunicação óptico exerce um impacto decisivo no desempenho do mesmo pois, para situações idênticas, os resultados obtidos, consoante o formato de modulação usado, são muito díspares.

No capítulo 4.1 analisaram-se os espectros ópticos à saída do transmissor para diferentes formatos de modulação. Aqui, destacam-se os formatos 16-QAM e 64-QAM devido à sua menor ocupância espectral quando comparado com os restantes. Refira-se ainda que o formato com maior ocupância espectral é o RZ, o que é indicador de um pior desempenho, que de acordo com os resultados obtidos nos estudos posteriores se veio a confirmar.

Analisando os resultados obtidos para a penalidade de potência, conclui-se que os formatos de modulação em intensidade demonstram um desempenho inferior aos demais. Contudo, considerando apenas os formatos em intensidade observou-se que para 2.5Gbps, a penalidade de potência mantêm-se sempre baixa (inferior a 0.25dB), no entanto, para 10Gbps é o RZ que apresenta os piores resultados. Para distâncias superiores a 40Km, este formato deixa de permitir a transmissão enquanto outros formatos permitem a transmissão para as mesmas circunstâncias, até 60km ou 70km como é o caso do NRZ e Duobinário respectivamente, ou como se constatou para o caso do VSB, até distâncias superiores a 100km.

Para 20Gbps nenhum dos formatos de intensidade permite a transmissão para distâncias acima dos 30km. Esta situação não se verifica para os formatos de modulação em fase e em amplitude e fase (QPSK, DQPSK, 16-QAM e 64-QAM).

Verifica-se que estes formatos demonstram um bom comportamento para 10Gbps e 20Gbps apresentando penalidades sempre inferiores a 3.5dB para qualquer comprimento de fibra, o que representa uma melhoria significativa em relação aos formatos de modulação em intensidade pois destes, para 10Gbps, apenas o VSB permite a transmissão até aos 100km e mesmo este, apresenta uma penalidade de 9.6dB, consideravelmente superior a qualquer penalidade dos formatos de fase ou amplitude e fase.

Considerando o ritmo de transmissão de 20Gbps, os formatos 16-QAM e 64-QAM demonstram ter os melhores resultados permitindo transmissões até aos 40km e 50km com penalidades de 3.9dB e 1dB aproximadamente. Para este ritmo de transmissão os formatos de fase já não apresentam marcas semelhantes (como acontece para 10Gbps). As distâncias de transmissão possíveis são inferiores e com penalidades superiores (10km com uma penalidade de 3.4dB para o QPSK e 30km com 8.6dB para o DQPSK).

Tendo em conta os resultados obtidos com a caracterização espectral dos formatos estudados em “*back-to-back*” bem como os resultados da penalidade de potência acima referidos conclui-se que a ocupância espectral de um formato de modulação (à saída do transmissor óptico) é um factor preponderante no desempenho de um determinado formato. Note-se que se verificou uma relação inversa entre a ocupância espectral de um formato de modulação e o desempenho do mesmo formato.

Também se pode concluir, com base nos resultados obtidos nas simulações da penalidade de potência que, considerando os formatos de modulação em intensidade é o VSB que demonstra ter uma maior robustez face às penalidades induzidas pela fibra, sendo o RZ aquele de mostra resultados inferiores. De notar ainda que o Duobinário mostra resultados ligeira mente superiores ao NRZ (para 10Gbps ambos permitem transmissões até aos 70km embora aqui o Duobinário apresenta uma penalidade 15.8dB inferior ao NRZ).

Analisando os resultados para o estudo feito a 40Gbps entre os 0.5km e 10km confirma-se as conclusões anteriores. Destacam-se pelo desempenho os formatos 16-QAM e 64-QAM. No entanto, para os 10km a penalidade do 64-QAM sofre uma subida abrupta sem aparente razão. Esta questão foi explicada através da análise dos valores da potência óptica recebida (ROP) em “*back-to-back*”. Verificou-se que, tendencialmente, quanto mais avançado é um sistema de modulação maior é a potência óptica necessária para uma taxa de erros fixa. No caso do 64-QAM, verificou-se que a potência óptica necessária em “*back-to-back*” para a taxa de erros considerada em todos os casos (10^{-12}) é de -8.58dBm. Este valor está 136% acima da média das potências ópticas dos demais formatos para as mesmas condições. O que leva à conclusão de que o valor de penalidade subiu abruptamente não devido aos efeitos dispersivos da fibra mas apenas por uma questão de falta de potência no sinal recebido. Problema facilmente solúvel através da pré-amplificação do sinal.

Analisando os valores obtidos da dispersão acumulada para uma penalidade de 2dB confirmam-se as conclusões anteriores. Para ritmos baixos qualquer um dos formatos

estudados, apresenta um bom comportamento permitindo a transmissão com uma penalidade sempre inferior a 2dB.

Para ritmos de transmissão mais elevados (10Gbps, 20Gbps e 40Gbps) os formatos de modulação em intensidade apresentam maiores dificuldades. Para 10Gbps estes formatos apresentam valores de dispersão suportada inferiores aos restantes. A 10Gbps apenas o VSB suporta uma dispersão superior a 1000ps/nm (~ 1290 ps/nm), valor ultrapassado por todos os outros formatos de fase e amplitude e fase. Para 20Gbps este comportamento mantém-se. Apenas o VSB se aproxima dos resultados dos formatos de fase e amplitude e fase. Destes últimos, são os formatos 16-QAM e 64-QAM os únicos que suportam dispersões superiores a 500ps/nm. Em especial, o 64-QAM que suporta uma dispersão cerca de 1.5 vezes superior ao do 16-QAM (~ 850 ps/nm).

Para 40Gbps o cenário é idêntico. Os formatos de modulação em intensidade suportam dispersões tipicamente inferiores a metade quando comparadas com os restantes e, entre os formatos de fase e amplitude e fase mais uma vez os formatos de amplitude e fase com melhor desempenho em particular o 64-QAM.

Tendo em conta os resultados obtidos das simulações realizadas em WDM, confirma-se o padrão de comportamento observado nos estudos anteriores.

Devido à sua menor ocupância espectral, os formatos de modulação em fase e amplitude e fase permitem um espaçamento entre canais muito inferior quando comparado com os formatos em intensidade (~ 10 GHz de espaçamento entre canais para os primeiros face aos 35GHz dos últimos). É de especial importância para os sistemas WDM que o espaçamento entre canais seja o menor possível, de modo a que as capacidades oferecidas pelas fibras ópticas sejam, o mais eficientemente possível, aproveitadas.

Assim, considerando todos os resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que para ritmos de transmissão elevados são os formatos de modulação em amplitude e fase, aqueles que demonstram capacidade para um desempenho superior. Conclui-se também que, quanto maior o número de bits codificados em cada símbolo transmitido melhores poderão ser os resultados. No entanto, é necessário ter em atenção a potência óptica exigida pelo formato de modo a apresentar esse bom desempenho. Logo, será sempre necessário encontrar o melhor compromisso entre desempenho e potência óptica exigida.

5.2 – Sugestões

Sugere-se que no futuro seja feito um estudo semelhante ao realizado neste trabalho para outros formatos de modulação avançados como o CP-QPSK e o OFDM. Para além de um estudo comparativo com parâmetros semelhantes aos deste trabalho, deverão ser considerados os principais efeitos não lineares nas simulações realizadas.

Dever-se-á realizar estudos para situações mais complexas, incluindo amplificadores filtros e fibras DCF bem como transmissões multi-canal para cenários mais complexos e próximos da realidade.

Finalmente, o autor pensa que será interessante verificar os resultados e conclusões obtidas através das simulações, fazendo testes e ensaios na prática, das situações simuladas no VPISystemsTM.

Referências

- [1] A. Jones, *Historical Sketch of the Electrical Telegraph*, Putman, New York, 1852 em G.P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, Wiley, New York (1992).
- [2] K. C. Kao e G. A. Hockham, *Proc. IEE* 113, 1151 (1966).
- [3] A. Werts, *Onde Elect.* 45, 967 (1966).
- [4] I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy e S. Sumski, *Appl. Phys. Lett.* 17, 109 (1970).
- [5] T. C. Cannon, D. L. Lope e D. D. Sell, *IEEE Trans. Commun.* COM-26, 1045 (1978).
- [6] K. Oe, S. Ando e K. Sugiyama, *Jpn. J. Appl. Phys.* 16, 1273 (1977).
- [7] J. I. Yamada, *et.al.*, *Electron. Lett.*, 17, 2, 479 (1981).
- [8] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, Wiley, New York (1994).
- [9] Ciaramella, E. (2002). Nonlinear impairments in extremely dense WDM systems. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 14(6), 804-806.
- [10] Sang-Yuep, K., Sang-Hoon, L., Sang-Soo, L., & Jae-Seung, L. (2004). Upgrading WDM networks using ultradense WDM channel groups. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 16(8), 1966-1968.
- [11] Andre, P., Kauffmann, N., Desrousseaux, P., Godin, J., & Konczykowska, A. (1999). *InP HBT circuits for high speed ETDM systems*. Paper presented at the Circuits and Systems, 1999. ISCAS '99. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on.
- [12] Derksen, R. H., Moller, M., & Schubert, C. (2007). *100-Gbit/s Full-ETDM Transmission Technologies*. Paper presented at the Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, 2007. CSIC 2007. IEEE.
- [13] Elbers, J. P. (2002). *High-capacity DWDM/ETDM transmission*. Paper presented at the Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2002. OFC 2002.
- [14] Jansen, S. L., Derksen, R. H., Schubert, C., Zhou, X., Birk, M., Weiske, C. J., et al. (2007). *107- Gb/s full-ETDM transmission over field installed fiber using vestigial sideband modulation*. Paper presented at the Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2007. OFC/NFOEC 2007. Conference on.

- [15]Kauffmann, N., Blayac, S., Abboun, M., Andre, P., Aniel, F., Riet, M., et al. (2001). InP HBT driver circuit optimization for high-speed ETDM transmission. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, 36(4), 639-647.
- [16]Lach, E., & Schuh, K. (2006). Recent Advances in Ultrahigh Bit Rate ETDM Transmission Systems. *Lightwave Technology, Journal of*, 24(12), 4455-4467.
- [17]Schuh, K., Junginger, B., Rempp, H., Klose, P., Rosener, D., & Lach, E. (2005). 85.4 Gbit/s ETDM transmission over 401 km SSMF applying UFEC. Paper presented at the Optical Communication, 2005. ECOC 2005. 31st European Conference on.
- [18]Abas, A. F. (2006). *Chromatic Dispersion Compensation in 40 Gbaud Optical Fiber WDM Phase- Shift-Keyed Communication Systems*. Universität Paderborn.
- [19]Cho, P. S., Grigoryan, V. S., Godin, Y. A., Salamon, A., & Achiam, Y. (2003). Transmission of 25-Gb/s RZ-DQPSK signals with 25-GHz channel spacing over 1000 km of SMF-28 fiber. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 15(3), 473-475.
- [20]Gnauck, A. H., Winzer, P. J., Dorrer, C., & Chandrasekhar, S. (2006). Linear and nonlinear performance of 42.7-Gb/s single-polarization RZ-DQPSK format. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 18(7), 883-885.
- [21]Renaudier, J., Charlet, G., Salsi, M., Pardo, O. B., Mardoyan, H., Tran, P., et al. (2008). Linear Fiber Impairments Mitigation of 40-Gbit/s Polarization-Multiplexed QPSK by Digital Processing in a Coherent Receiver. *Lightwave Technology, Journal of*, 26(1), 36-42.
- [22]Gnauck, A. H., Charlet, G., Tran, P., Winzer, P. J., Doerr, C. R., Centanni, J. C., et al. (2008). 25.6-Tb/s WDM Transmission of Polarization-Multiplexed RZ-DQPSK Signals. *J. Lightwave Technology*, 26(1), 79-84.
- [23]WINZER, P.J.; ESSIAMBRE, R.J. *Advanced optical modulation formats*. Proceedings of the IEEE, vol. 94, no. 5, p. 952–985. 2006a.
- [24]DESURVIRE, E.B. *Capacity demand and technology challenges for lightwave systems in the next two decades*. IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 24, no. 12, p. 4697–4710. 2006.
- [25]WINZER, P.J.; ESSIAMBRE, R.J. *Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks*. IEEE Journal of Lightwave Technology, vol. 24, no. 12, pp. 4711–4728. 2006b.
- [26]GARCIA, B.S.A., *Efficient modulation formats for high bit-rate fiber transmission*.

University of Texas at Dallas. 2005.

[27]ZHANG, S. *Advanced Optical Modulation Formats in High-speed Lightwave System*. University of Kansas: Department of Electrical Engineering and Computer Science. 2004.

[28]BUCK, J.A. *Fundamentals of optical fibers*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1995.

[29]LATHI, B.P. *Modern digital and analog communication system*. 3.ed. New York: Oxford, 1998.

[30]Ibrahim, S. K., Bhandare, S., & Noe, R. (2006). Performance of 20 Gb/s quaternary intensity modulation based on binary or duobinary modulation in two quadratures with unequal amplitudes. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 12(4), 596-602.

[31]Said, M. M. E., Sitch, J., & Elmasry, M. I. (2005). An electrically pre-equalized 10-Gb/s duobinary transmission system. *Lightwave Technology, Journal of*, 23(1), 388-400.

[32]Yonenaga, K., & Kuwano, S. (1997). Dispersion-tolerant optical transmission system using duobinary transmitter and binary receiver. *Lightwave Technology, Journal of*, 15(8), 1530-1537.

[33]Ghafour Amouzad Mahdiraji and Ahmad Fauzi Abas. *Advanced Modulation Formats and Multiplexing Techniques for Optical Telecommunication Systems*, UCSI University & Universiti Putra Malaysia, Malaysia